

doi:10.3799/dqkx.2010.072

南海表层沉积物中细粒组分的 稀土元素地球化学特征

刘建国¹, 陈忠¹, 颜文¹, 陈木宏¹, 殷学博²

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

摘要: 对南海表层沉积物中的细粒组分进行电感耦合等离子体质谱法测试, 探讨南海稀土元素分布特征及其影响因素。结果表明, 南海表层沉积物中稀土元素分布主要与陆源物质输入、生物活动和火山物质补给密切相关。南海细粒组分的配分模式与中国黄土的接近, 与周边的珠江、湄公河等河流输入物质也有相似性, 而与南海碱性玄武岩存在显著差异, 表明南海沉积物主要来自于周边大陆。稀土元素趋势分析表明, 珠江口往外至海南岛南部海域中沉积物朝东南方向向陆坡输送; 台西南至珠江口往外海域沉积物大多向南输运; 吕宋岛西部海域包括黄岩岛附近海域的火山物质主要向西北方向输送, 向西可达 113°E, 向北可至 20°N 附近; 南海南部沉积物整体上向南沙海槽西北部附近海域输送。

关键词: 稀土元素; 地球化学; 表层沉积物; 细粒组分; 趋势分析; 南海。

中图分类号: P595, P736.4

文章编号: 1000-2383(2010)04-0563-09

收稿日期: 2009-11-20

Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements in the Fine-Grained Fraction of Surface Sediment from South China Sea

LIU Jian-guo¹, CHEN Zhong¹, YAN Wen¹, CHEN Mu-hong¹, YIN Xue-bo²

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Rare earth elements (REE) in the fine-grained fraction of surface sediments were detected by ICP-MS analysis, to study distribution characters of REE and the influencing factors in the South China Sea. Results reveal that distribution of REE in sediments is mainly related with continental input, biological effects and provision of volcanic materials in the South China Sea. The REE NASC normalization distribution pattern of average fine-grained fraction in the South China Sea is similar to that in Chinese loess, and also those of coastal rivers including the Pearl River and Mekong River, but sharply different from that of Cenozoic basalts from the South China Sea, indicating that fine-grained fraction was mostly derived from the mainland substance. Trend analysis of REE indicates that fine-grained fraction between the Pearl River Mouth and the southern Hainan Island was transported into the slope in the southeastern direction, while sediments between the southwestern Taiwan Island and the Pearl River Mouth were mostly transported southward. Sediments in the western Luzon Island and near the Huangyan Island were mainly conveyed northwestward, which could reach 113°E in the west and 20°N in the north. In the southern South China Sea, sediments were wholly transported towards the northwestern Nansha trough.

Key words: rare earth elements; geochemistry; surface sediments; fine-grained fraction; trend analysis; South China Sea.

由于在风化作用中稀土元素发生的各种分异在其迁移过程中被消除, 一旦进入海洋环境中, 沉积物

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40631007); 国家“973”项目(Nos. 2007CB815905, 2009CB219502); 国家基金委—广东联合基金(No. U0733003); 国家科技支撑计划项目(No. 2006BAB19B03); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(Nos. SQ200713, LYQY200704); 中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金(No. MSGL08-16); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金(No. MGE2008KG08)。

作者简介: 刘建国(1978—), 男, 助理研究员, 从事海洋沉积与古环境研究. E-mail: jgliu@scsio.ac.cn

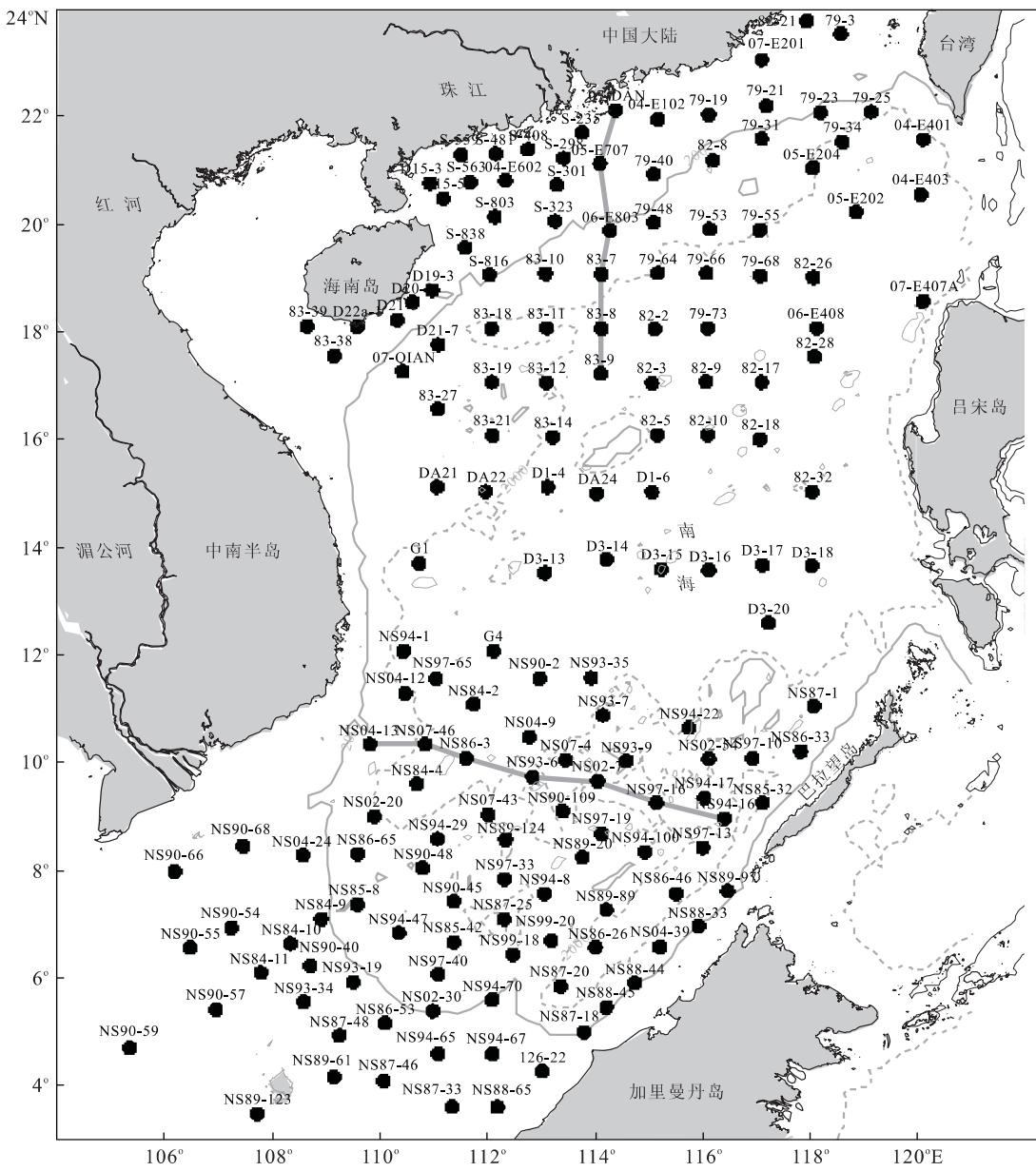


图 1 南海表层沉积物取样站位分布

Fig. 1 Sampling location for surficial sediments of the South China Sea

的稀土成分基本无重大变化, 其配分模式也保持不变(古森昌等, 1989)。因此, 研究海洋沉积物稀土元素地球化学特征, 在物源判断(Yang *et al.*, 2002; Munksgaard *et al.*, 2003)、气候环境探讨(Murray and Leinen, 1993; Holser, 1997; 李双林, 2001)和地层对比(刘季花等, 1994; Mazumdar *et al.*, 1999)等方面有着广泛应用。

前人已对渤海(赵一阳和鄢明才, 1994)、黄海(王金土, 1990)、东海(王贤觉等, 1982)及台湾浅滩(吴明清, 1983)等中国海区表层沉积物稀土元素地球化学特征做过较为系统的分析。南海作为东亚大陆最南的一个边缘海, 蕴含着大陆与海洋之间物质

和能量交换的多种信息(陈忠等, 2002), 其中沉积物物质来源判别是西太平洋边缘海海陆相互作用研究的重点内容之一(朱赖民等, 2007)。相对中国其他边缘海, 南海表层沉积物地球化学特征的研究较为零散, 主要分不同区域进行稀土元素地球化学分析, 如南海 12°N 以北海域(古森昌等, 1989)、珠江口伶仃洋海区(刘岩等, 1999)、邵磊等(1999)与高志友(2005)先后对南海表层沉积物样品中的稀土元素地球化学做过分析, 但和前人一样, 均是分析原始样品, 并未考虑消除沉积物粒度对稀土元素含量的控制作用。

由于稀土元素含量明显受沉积物粒度控制(古

森昌等,1989;赵一阳和鄢明才,1994;朱赖民等,2007),尽管南海表层沉积物以粉砂和粘土组分为主,但陆架上沉积物中的砂甚至砾含量仍然较高(罗又郎等,1994),故利用表层沉积物中细粒组分的稀土元素指标来揭示南海沉积物稀土元素地球化学特征比直接用全岩沉积物样品中的相应指标来反映的效果要好。本文基于南海海域内165个站位(图1)表层沉积物样品详细的稀土元素地球化学特征研究,探讨了影响表层细粒组分稀土元素区域分布的陆源、火山源与生物源因素,初步分析了稀土元素迁移趋势。

1 材料与方法

本文在中国科学院南海海洋研究所历年来在南海已获取表层沉积物样品的基础上,按照基本均匀分布原则,从中选取出165个站位样品供分析(图1),用湿筛筛选其中小于0.063 mm的细颗粒组分,做稀土元素测试分析。

沉积物样品在80℃烘干,研磨至200目备测。样品的前处理及分析测试均在中国科学院海洋研究所海洋环境与地质重点实验室完成。分析步骤为:(1)准确称取0.04 g样品置于Teflon溶样罐中,加入0.6 mL HNO₃和2 mL HF封盖后震摇样品,静置2 h,于150℃电热板上溶样24 h;(2)开盖,加入0.25 mL HClO₄,于150℃电热板上敞开蒸酸至近干,加入0.6 mL HNO₃和2 mL HF封盖,于150℃电热板上溶样24 h;(3)开盖,加入0.25 mL HClO₄,于150℃电热板上敞开蒸酸至近干;再加入1 mL HNO₃和1 mL H₂O,密闭于150℃电热板回溶12 h;(4)用高纯水定容至40 g,最后上机测试稀土元素。

分析测试采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,仪器型号:Elan DRC II),分析的元素包括La、Ce、Pr、Nd、Sm和Eu(轻稀土元素,用LREE表示),以及Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu和Y(重稀土元素,用HREE表示)。为了监控测试精度与准确度,对国际标样、重复样与空白样品进行了分析,结

果表明测定元素含量的相对偏差均小于5%。

2 分析结果

2.1 稀土元素含量与区域分布特征

南海表层细粒组分的测试分析显示,除北部陆架2个站位(79—21和82—8)的稀土元素总量出现异常高值(分别对应839×10⁻⁶和585×10⁻⁶)外,其他站位稀土元素的含量变化范围及平均值见表1。

从表1可知,南海表层细粒组分中ΣREE的平均值为165.6×10⁻⁶,比较接近于中国黄土中的ΣREE值(171×10⁻⁶,据吴明清(1983)),而与深海粘土中稀土元素的ΣREE值(411×10⁻⁶,据Frey and Haskin(1964))相差较大。

南海表层细粒组分中部分稀土元素参数的区域分布如图2所示。稀土元素总量(即ΣREE值)和轻/重稀土元素(ΣLREE/ΣHREE)存在着5个高值区(图2a和2b),分别位于南海北部陆架西北缘、南海北部海南岛东南缘、南海北部黄岩岛西北缘(18°N,117°E附近)、南海中部(12°N,114°E附近)和巽他陆架上。另外,稀土元素总量还存在两个低值区,分别位于(16°N,112°E附近)和南沙海槽(10°N,115°E附近)。而图2d显示在上述位置δEu值刚好相反,即δEu低值区对应于ΣREE高值区,δEu高值区对应于ΣREE低值区。图2c显示在巴拉望岛西侧靠近南沙海槽附近存在一个δCe低值区,而在吕宋岛西侧黄岩岛附近出现一个δCe高值区。

2.2 稀土元素的配分模式

由于海洋沉积物中稀土元素的配分模式主要受物源的影响(古森昌等,1989;李双林,2001;Yang et al.,2002),故可利用稀土元素在迁移和沉积过程中的不活性及在不同条件下表现出的分异特性来揭示沉积物物质来源、形成条件、物源区特征和环境变化等(朱赖民等,2007)。

南海表层细粒组分中稀土元素平均值的北美页岩(Gromet et al.,1984)标准化配分模式(图3)与中国黄土(Wu et al.,1991)接近,与长江口(李俊

表1 南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素含量(10⁻⁶)

Table 1 Concentrations of REEs in the fine-grained fraction of surface sediments from the South China Sea

| 元素 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | ΣREE |
|-----|------|-------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 最大值 | 76.5 | 151.9 | 17.2 | 64.0 | 10.4 | 1.5 | 10.6 | 1.3 | 6.8 | 1.4 | 3.8 | 0.6 | 3.9 | 0.6 | 349.8 |
| 最小值 | 5.7 | 5.9 | 1.2 | 4.3 | 1.0 | 0.2 | 1.0 | 0.2 | 0.9 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 21.7 |
| 平均值 | 35.4 | 69.5 | 7.9 | 29.4 | 5.4 | 1.1 | 5.5 | 0.8 | 4.2 | 0.9 | 2.5 | 0.4 | 2.4 | 0.4 | 165.6 |

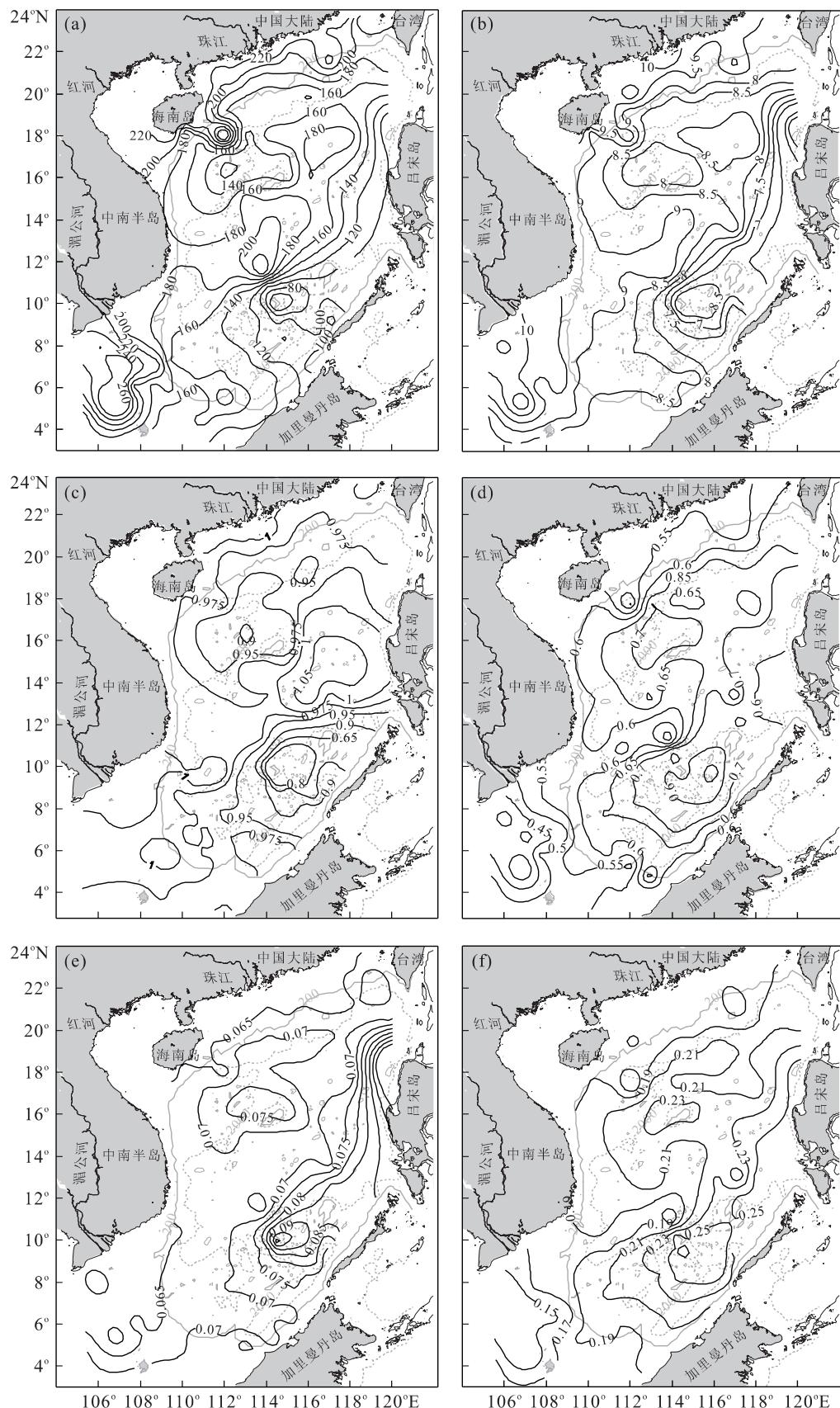


图 2 南海表层沉积物部分稀土元素参数分布等值线

Fig. 2 Contour of some rare earth element distribution for surficial sediments of South China Sea
 a. ΣREE ; b. $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$; c. δCe ; d. δEu ; e. $\Sigma\text{MREE}/\Sigma\text{REE}$; f. Eu/Sm

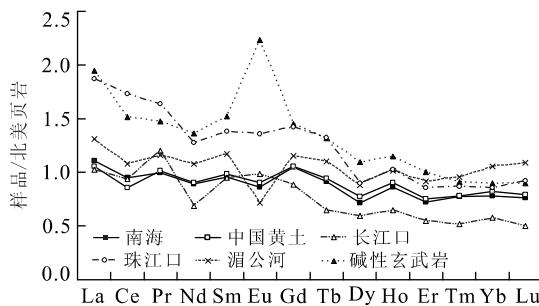


图3 南海沉积物与中国黄土、长江口、珠江口、湄公河沉积物以及南海碱性玄武岩稀土元素北美页岩标准化模式比较

Fig. 3 Comparison of NASC-normalized REE pattern of South China Sea sediments, Chinese loess, Yangtze River Mouth, Pearl River Mouth, Mekong River sediments and Cenozoic basalt in the South China Sea

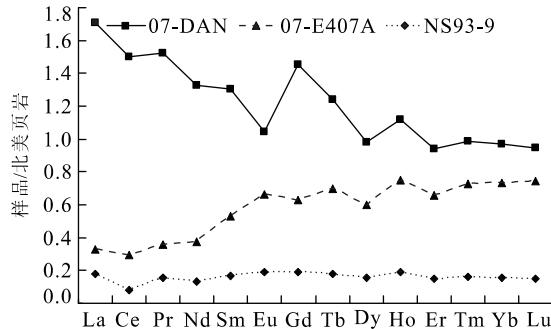


图4 南海表层沉积物不同来源稀土元素北美页岩标准化模式

Fig. 4 NASC-normalized REE pattern of various source sediments in the South China Sea
07-DAN 代表陆源为主; 07-E407A 代表火山源为主; NS93-9 代表生物源为主

等, 2008)、珠江口(刘岩等, 1999)、湄公河(Borges *et al.*, 2008)等有一定的相似性(如负Eu异常), 而与南海碱性玄武岩(Yan *et al.*, 2008)差异较大, 反映出南海沉积物主要与陆源输入有关, 而与火山活动关系不是很密切。

南海不同海域表层细粒组分中稀土元素的北美页岩标准化配分曲线也存在一定差异(图4). 当陆源物质影响强烈时(如07-DAN), 不仅其 \sum REE值较大, 且呈明显的Eu负异常, 轻稀土元素相对富集; 当火山源物质影响强烈时(如07-E407A), 则几乎无Eu异常出现, 重稀土元素相对富集; 当生物源物质影响强烈时(如NS93-9), \sum REE值明显偏低。

3 讨论

3.1 陆源物质输入

南海沉积物主要为沿岸河流物质输入, 汇入南海的主要河流包括华南沿岸的珠江和韩江以及中南半岛上的红河、湄公河和湄南河等。其他的河流, 包括加里曼丹岛、巴拉望岛、吕宋岛和苏门答腊岛上的河流都不长, 流域及流量亦较小, 它们所携带的陆源碎屑沉积物, 多分布在河口及其邻近的沿岸地区。

由图2和图5可知, 南海表层细粒组分中的 \sum REE高值区与 δ Eu低值区均对应陆源物质影响强烈区域(罗又郎等, 1994; Liu *et al.*, 2007a). 图2b和2e主要反映火山物质的影响, 图2c则主要反映陆源和火山源的共同作用, 尤其是吕宋岛来源物质对南海表层沉积物的强烈影响。图5还显示, 南海表层沉积物有着相近的成因——陆地物质来源, 且随着离岸距离的增加, \sum REE值与 δ Eu值有所减小; 同时由于陆源物质中轻稀土(\sum La-Nd)相对富集, 重稀土(\sum Er-Lu)相对缺乏, 造成从陆向海方向 \sum La-Nd值缓慢减少、而 \sum Er-Lu值逐渐增大, 表明 \sum REE值以及 δ Eu值均可作为陆源物质输入的良好指标; 还可揭示南海表层细粒组分主要来源于沿岸的陆源物质, 而陆坡和海盆沉积物中可能有幔源

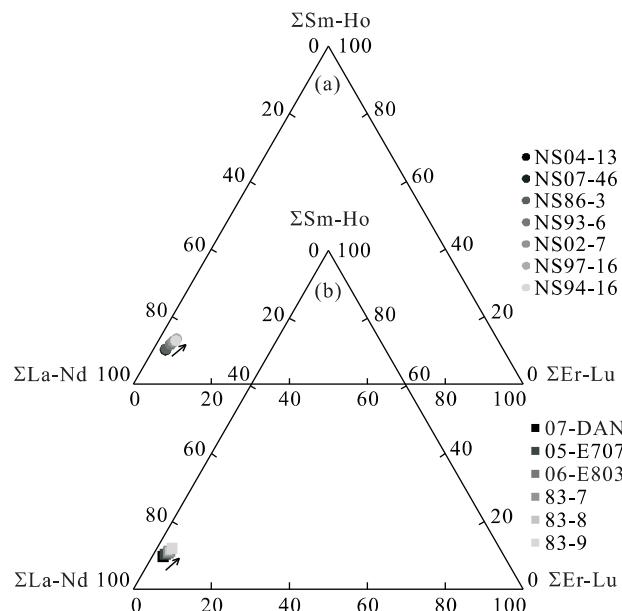


图5 南海表层沉积物稀土元素三组分图解

Fig. 5 Triangular diagram of REE of surface sediments in the South China Sea

a. 南北方向剖面; b. 近东西方向剖面, 剖面具体位置见图1

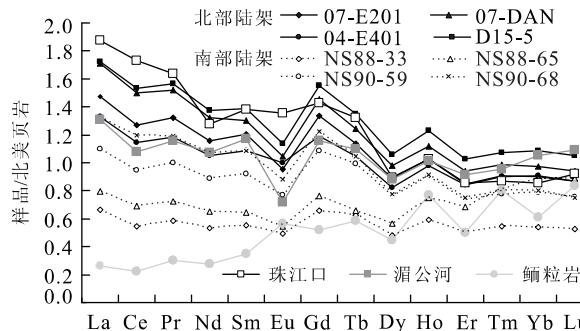


图 6 南海北部陆架、南部陆架、珠江口、湄公河沉积物与印度尼西亚鲕粒岩的稀土元素配分模式

Fig. 6 NASC-normalized REE pattern of the northern slope, southern slope, Pearl River Mouth, Mekong River sediments and Indonesia ooids

物质加入(古森昌等, 1989; 朱赖民等, 2007)或者海洋生物活动加强(陈木宏等, 2008a, 2008b; 罗又郎等, 1994)。

从图 6 中可知, 其稀土元素配分模式基本相似, 只是南部陆架各稀土元素含量略低一些。在北部陆架, 沉积物中细粒组分的稀土元素配分模式与珠江口(刘岩等, 1999)的接近, 这与北部沉积物主要来自珠江等沿岸河流物质输入有关。而在南部陆架, 细粒组分的稀土元素配分模式介于湄公河和印度尼西亚鲕粒岩(Sturesson *et al.*, 2000)之间, 反映南部陆架沉积物中的细粒组分不仅有来自湄公河的陆源组分, 可能还有与火山活动有关的火山源物质输入(Liu *et al.*, 2007b)。这种差异为探讨沿岸河流物质入海对南海表层沉积物分布的影响范围及其程度提供了可能。

3.2 火山源物质影响

火山源物质在稀土元素配分模式方面有着显著特征, 即几乎无 Eu 异常出现, 当母岩为玄武岩时多出现正 Ce 异常(Yan *et al.*, 2008)。

在吕宋岛西侧黄岩岛附近海域表层的细粒组分, 其 $\sum \text{REE}$ 和 δCe 值较高, δEu 相对较低(图 2), 且配分模式线平缓(图 4), 说明其为典型火山源物质特征。这与前人发现在黄岩岛附近海域由于火山活动频繁造成沉积物中普遍含有较高含量的火山碎屑矿物及火山玻璃等(邱传珠, 1983; 陈忠等, 2005)相一致。

另外, 在南海北部陆架—陆坡区(中心位于 $22^{\circ}\text{N}, 117^{\circ}\text{E}$)也存在一个与火山源物质具有相近稀土元素地球化学性质的沉积物展布区域, 揭示出该区域可能同样也受到火山物质影响, 这与前人已经

报道台湾浅滩以南陆坡上缘有近南北向分布、沉积物中火山物质含量较高的现象(以火山玻璃为主, 邱传珠, 1983; 陈忠等, 2005)基本上是吻合的。

3.3 生物源物质作用

在南海的半深海—深海沉积中, 生物碎屑的含量非常丰富。其中绝大多数的生物种类具有钙质、硅质的壳体或骨骼, 如有孔虫、放射虫、介形类和硅藻等微生物, 它们体形微小, 种类繁多, 数量巨大且广泛分布于海洋环境中。

图 2 显示, 在巴拉望岛西侧靠近南沙海槽附近海域有一明显的 $\sum \text{REE}$ 低值区, 其 δCe 值较高、 δEu 值与 $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 比值均较低, 而 MREE 也相对轻微富集等。稀土元素配分模式则显示, 其中心区域表层细粒组分中的 $\sum \text{REE}$ 值较南海以陆源和火山源物质为主沉积物中的 $\sum \text{REE}$ 值也要低得多。这些说明该处沉积物受生物活动影响较为强烈, 这与在深海盆地中生物碎屑含量非常丰富(罗又郎等, 1994; Chen *et al.*, 2008c; 陈木宏等, 2008a, 2008b)密不可分。

另一个 $\sum \text{REE}$ 低值区位于西沙群岛附近海域, 该区内沉积物稀土元素地球化学性质与南沙海槽附近的较为相似, 说明此处沉积物同样受生物活动影响较为明显。这与此处海底沉积物主要为含硅质的

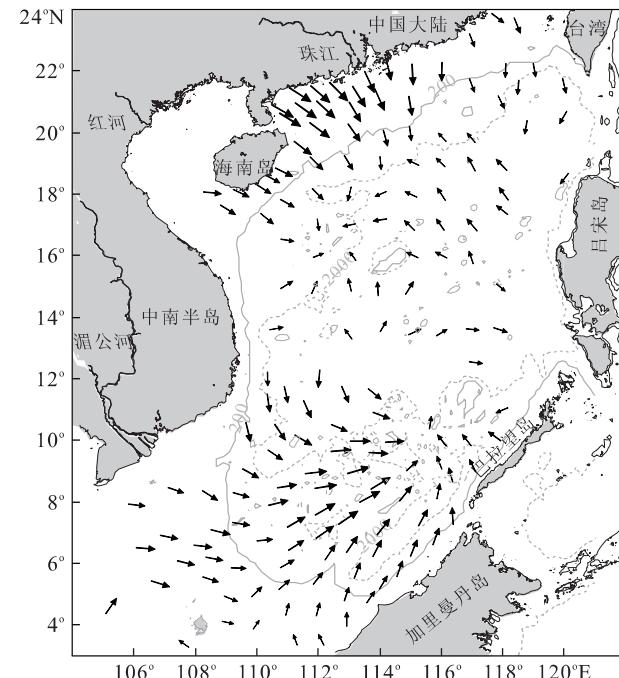


图 7 南海表层沉积物中稀土元素搬运趋势分布

Fig. 7 Transport patterns of REE in surface sediments of the South China Sea

钙质泥、有孔虫、介形虫和放射虫等微体生物大量发育(Chen *et al.*, 2008)有着紧密联系。

3.4 稀土元素搬运趋势

利用趋势分析得出南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素输运趋势如图7所示,图中箭头方向代表相邻点位之间的趋势方向(矢量长度仅表示出现这种方向的显著性,并不代表输运强度)。

从图7可知,珠江口往外至海南岛南部海域中沉积物基本上为垂直海岸带横跨大陆架向陆坡输送,台湾岛物质与长江物质进入南海后大多向南输运;吕宋岛西部海域包括黄岩岛附近海域的火山物质主要向西北方向输送,向西可达 113°E 、向北可至 20°N 附近;南海南部沉积物整体上向南沙海槽西北部附近海域输送,其中湄公河携带入海物质横跨巽他陆架朝东南迁移,加里曼丹岛物质入海后向东北方向输送,巴拉望岛西部海域沉积物向西北方向输运。

4 结论

用ICP-MS测试了南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素含量,并分析了稀土元素分布特征及其影响因素,获得以下几点认识:

(1)南海表层细粒组分中的稀土元素平均含量与中国黄土、南海沿岸河流沉积物较为接近,与南海碱性玄武岩有着显著差异,说明南海沉积物的物质来源主要为周缘大陆。同时,随着离岸距离和水深的增加,稀土元素含量呈现出缓慢渐变的趋势,这与陆源物质影响减弱有关。

(2)南海表层细粒组分中的稀土元素含量具有明显的区域分布特征,这与陆源物质、火山源物质以及生物源物质的影响密不可分。当以陆源物质为主时,稀土元素总量(ΣREE)较高、相对富集轻稀土以及Eu呈负异常;当以火山源物质为主时,相对富集重稀土、 δCe 值较高、 δEu 相对较低且配分模式线平缓;当以生物源物质为主时, ΣREE 值明显偏低、中稀土元素轻微富集、 δEu 较低、 δCe 值较高。

(3)各稀土元素参数区域分布特征显示,在南海北部陆架与南部巽他陆架均为陆源物质影响强烈区域,同时在海南岛东南部(中心位于 $18^{\circ}\text{N}, 112^{\circ}\text{E}$)和南沙群岛西北缘(中心位于 $12^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E}$ 附近)海域陆源物质影响也较强烈。但相邻两海域(中心分别位于 $16^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E}$ 和 $10^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$ 附近)为 ΣREE 低值区,这不仅说明陆源物质影响减弱,而且表明生物活动的影响明显加强。另外,在吕宋岛西侧黄岩岛附近

存在一个 ΣREE 值较高海域,这与火山源物质的供给有紧密联系。

(4)稀土元素趋势分析表明,珠江口往外至海南岛南部海域中沉积物基本上为垂直海岸带横跨大陆架向陆坡输送,台湾岛物质与长江物质进入南海后大多向南输运;吕宋岛西部海域包括黄岩岛附近海域的火山物质主要向西北方向输送,向西可达 113°E 、向北可至 20°N 附近;南海南部沉积物整体上向南沙海槽西北部附近海域输送,其中湄公河携带入海物质横跨巽他陆架朝东南迁移,加里曼丹岛物质入海后向东北方向输送,巴拉望岛西部海域沉积物向西北方向输运。

本文所用样品主要来源于历年的“南沙群岛及其邻近海区综合科学考察”及“中国科学院南海海洋研究所南海北部开放航次”,同济大学海洋地质国家重点实验室杨守业副教授对文章的修改提出过宝贵意见,特表谢意!

References

- Borges, J. B., Huh, Y., Moon, S., et al., 2008. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East. *Chemical Geology*, 254(1–2): 52–72.
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008a. Radiolarian assemblages in surface sediments of the South China Sea and their marine environmental correlations. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 775–782 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008b. Distributions of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and their environmental implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 431–442 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008c. Preservation of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and its environmental implication. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3): 217–229.
- Chen, Z., Gu, S. C., Yan, W., et al., 2002. Characteristics of clastic deposit minerals in surface sediments of South Nansha trough and adjacent sea areas. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 84–90 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z., Xia, B., Yan, W., et al., 2005. Distribution, chemi-

- cal characteristics and source area of volcanic glass in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(5): 73—81 (in Chinese with English abstract).
- Frey, F. A., Haskin, L., 1964. Rare earths in oceanic basalts. *Journal of Geophysical Research*, 69 (4): 775—780.
- Gao, Z. Y., 2005. The Geochemical characteristics and provenance of the surface sediment in South China Sea (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese).
- Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., et al., 1984. The “North American Shale composite”: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48(12):2469—2482.
- Gu, S. C., Chen, S. M., Wu, B. H., et al., 1989. REE geochemistry in surface sediments of South China Sea. *Tropic Oceanology*, 8(2): 93—101 (in Chinese with English abstract).
- Holser, W. T., 1997. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132(1—4): 309—323.
- Li, J., Wang, T., Gong, Z. B., et al., 2008. Geochemical behaviors of rare earth elements in sediments of the estuary of Yangtze River. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 27(3):356—361 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., 2001. Geochemistry of rare earth element in sediments at HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 23 (3): 127—132 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Zhang, L. J., Liang, H. F., 1994. The REE geochemistry of sediments in core CC48 from the East Pacific Ocean. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 25(1): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Zhang, Z. L., Hong, H. S., 1999. Distribution characters and model of rare earth element (REE) in surface sediments from Lingdingyang area of Pearl River Estuary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19 (1):103—108 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007a. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52(8):1101—1111.
- Liu, Z. F., Zhao, Y. L., Li, J. R., et al., 2007b. Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: implications for source analysis and East Asian monsoon evolution. *Science in China (Series D)*, 50(11):1674—1684.
- Luo, Y. L., Feng, W. W., Lin, H. Z., 1994. Bottom sediment types and depositional characteristics of sediments of the South China Sea. *Tropic Oceanology*, 13(1):47—54 (in Chinese with English abstract).
- Mazumdar, A., Banerjee, D. M., Schidlowski, M., et al., 1999. Rare-earth elements and stable isotope geochemistry of early Cambrian chert-phosphorite assemblages from the Lower Tal formation of the Krol Belt (Lesser Himalaya, India). *Chemical Geology*, 156 (1—4): 275—297.
- Munksgaard, N. C., Lim, K., Parry, D. L., 2003. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(3):399—409.
- Murray, R. W., Leinen, M., 1993. Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific Ocean across a latitudinal transect at 135°W: tracking sedimentary major, trace and rare earth element fluxes at the Equator and the intertropical Convergence Zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(17):4141—4163.
- Qiu, C. Z., 1983. A study on the characteristics and distribution of ferromanganese sediment and volcanic debris sediment in South China Sea. *Tropic Oceanology*, 2 (4): 269—277, 335—336 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Dong, W. B., Liu, Z. W., et al., 1999. Trace elements analysis of sediments from the South China Sea. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 27 (Suppl.):55—60 (in Chinese with English abstract).
- Sturesson, U., Heikoop, J. M., Risk, M. J., 2000. Modern and Palaeozoic iron ooids—a similar volcanic origin. *Sedimentary Geology*, 136(1—2):137—146.
- Wang, J. T., 1990. REE geochemistry of surficial sediments from the Yellow Sea of China. *Geochimica*, 1: 44—53 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. J., Chen, Y. W., Lei, J. Q., et al., 1982. REE geochemistry in sea-floor sediments in the continental shelf of East China Sea. *Geochimica*, 1: 56—65 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. Q., 1983. REE geochemistry of sea-floor sediments from the Taiwan shallow, China. *Geochimica*, 3: 303—313 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. Q., Wen, Q. Z., Pan, J. Y., et al., 1991. Rare earth elements in the Malan loess from the middle reaches of the Huanghe River. *Chinese Science Bulletin*, 36(16): 1380—1385.
- Yan, Q. S., Shi, X. F., Wang, K. S., et al., 2008. Major element, trace element, and Sr, Nd and Pb isotope studies

- of Cenozoic basalts from the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 51(4): 550—566.
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Choi, M. S., et al., 2002. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) River sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(2): 407—419.
- Zhao, Y. Y., Yan, M. C., 1994. Geochemistry of sediments of the China shelf sea. Science Press, Beijing, 5—130 (in Chinese).
- Zhu, L. M., Gao, Z. Y., Yin, G., et al., 2007. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2963—2980 (in Chinese with English abstract).
- 古森昌,陈绍谋,吴必豪,等,1989.南海表层沉积物稀土元素的地球化学.热带海洋,8(2): 93—101.
- 李俊,汪霆,弓振斌,等,2008.长江口表层沉积物中稀土元素地球化学特征.台湾海峡,27(3): 356—361.
- 李双林,2001.东海陆架 HY126EA1 孔沉积物稀土元素地球化学.海洋学报,23(3): 127—132.
- 刘季花,张丽洁,梁宏峰,1994.太平洋东部 CC48 孔沉积物稀土元素地球化学研究.海洋与湖沼,25(1): 15—22.
- 刘岩,张祖麟,洪华生,1999.珠江口伶仃洋海区表层沉积物稀土元素分布特征及配分模式.海洋地质与第四纪地质,19(1): 103—108.
- 罗又郎,冯伟文,林怀兆,1994.南海表层沉积类型与沉积作用若干特征.热带海洋,13(1): 47—54.
- 邱传珠,1983.南海铁锰沉积物和火山碎屑沉积物特征及其分布规律的研究.热带海洋,2(4): 269—277, 335—336.
- 邵磊,董万百,刘志伟,等,1999.南海沉积物稀土微量元素分析.同济大学学报(自然科学版),27(增刊): 55—60.
- 王金土,1990.黄海表层沉积物稀土元素地球化学.地球化学,1: 44—53.
- 王贤觉,陈毓蔚,雷剑泉,等,1982.东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究.地球化学,1: 56—65.
- 吴明清,1983.我国台湾浅滩海底沉积物稀土元素地球化学.地球化学,3: 303—313.
- 赵一阳,鄢明才,1994.中国浅海沉积物地球化学.北京:科学出版社,5—130.
- 朱赖民,高志友,尹观,等,2007.南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化.岩石学报,23(11): 2963—2980.

附中文参考文献

- 陈木宏,张兰兰,张丽丽,等,2008a.南海表层沉积物中放射虫的组合特征与海洋环境.地球科学——中国地质大学学报,33(6): 775—782.
- 陈木宏,张兰兰,张丽丽,等,2008b.南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境.地球科学——中国地质大学学报,33(4): 431—442.
- 陈忠,古森昌,颜文,等,2002.南沙海槽南部及邻近海区表层沉积物中的碎屑矿物特征.热带海洋学报,21(2): 84—90.
- 陈忠,夏斌,颜文,等,2005.南海火山玻璃的分布特征、化学成分及源区探讨.海洋学报,27(5): 73—81.
- 高志友,2005.南海表层沉积物地球化学特征及物源指示(博士学位论文).成都:成都理工大学.