

东海外陆架晚第四纪沉积物的稀土元素组成及物源示踪

蓝先洪, 张志珣, 王中波, 陈晓辉

国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071;
青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 为研究东海外陆架稀土元素地球化学信息对于地层划分与物源分析的指示意义, 利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对东海外陆架西湖凹陷区 SFK-1 孔沉积物进行了 15 个稀土元素(REE)含量测定。东海外陆架 SFK-1 孔稀土元素含量及比值变化表现出一定的分层性, 垂向上自上而下可分为 8 层, 表明稀土元素特征对于地层划分具有良好的指示意义。稀土元素分配模式表明 SFK-1 孔沉积物物源主要为长江和黄河, Eu 异常与稀土元素总量关系判别图解和物源判别指数(PI)揭示 SFK-1 孔上部 28.00 m 以上沉积物以长江源为主, 中部 28.00~47.20 m 沉积物以黄河源为主, 下部 47.20~82.90 m 沉积物以长江源为主。研究表明长江从晚更新世早期到现代对东海陆架起着主要作用, 而黄河物质在晚更新世晚期已开始对东海陆架沉积作用有一定影响。

关键词: 稀土元素; 晚第四纪; 物源示踪; 东海外陆架

中图分类号: P595; P736.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.03.05

Distribution of Rare Earth Elements in Late Quaternary Sediments on the Outer Shelf of the East China Sea and Their Source Tracing

LAN Xian-hong, ZHANG Zhi-xun, WANG Zhong-bo, CHEN Xiao-hui

Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources,
Qingdao, Shandong 266071;
Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071

Abstract: The sediment samples collected from Core SFK-1 in the depression area of Xihu on the outer shelf of the East China Sea were measured for rare earth elements (REE) by using ICP-MS with the purpose of studying the indicator significance of REE geochemical information for the stratigraphic division and provenance analysis of the outer shelf sediments in the East China Sea. According to the variation of REE content and ratio, the sediments from Core SFK-1 can be divided into eight geochemical layers, suggesting that geochemical characteristics of REE have good indicator significance for stratigraphic division. The results show that the sediments in Core SFK-1 were mainly derived from the Yangtze River and the Yellow River. The sediments above the depth of 28.00 m in upper Core SFK-1 mainly belong to the Yangtze River source; the sediments between 28.00~47.20 m in middle Core SFK-1 was mainly derived from the Yellow River, and the sediments between 47.20 and 82.90 m at the bottom of Core SFK-1 was mainly derived from the Yangtze River. It is concluded that the Yangtze River has been playing a main role in the continental shelf of East China Sea since early Late Pleistocene and the Yellow River started to influence the continental shelf sedimentation of the East China Sea at the late stage of Late Pleistocene.

Key words: rare earth elements; Late Quaternary; source tracing; outer shelf of the East China Sea

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41206053)和国土资源大调查项目(编号: 1212010611301)联合资助。

收稿日期: 2013-09-26; 改回日期: 2014-01-10。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 蓝先洪, 男, 1958 年生。研究员。主要从事沉积地球化学与海洋地质研究。通讯地址: 266071, 山东青岛市福州南路 62 号。

电话: 0532-80778380。E-mail: lanxh@qingdaonews.com。

沉积物中稀土元素的含量、配分模式和一些重要的稀土元素参数对探讨沉积物的形成、物源区性质等具有重要意义(古森昌等, 1989; 吴明清等, 1991; 石学法等, 1996; Chen et al., 2003; Lim et al., 2006; 庞守吉等, 2008; Zhang et al., 2012; 蓝先洪等, 2006, 2013)。近几年来, 中国近海海域稀土元素分布特征已经得到了较为深入的研究(古森昌等, 1989; 王金土, 1990; 吴明清等, 1991; 王立军等, 1995; 石学法等, 1996; 王中良等, 2000; 庄克琳等, 2005; 李俊等, 2008; 张霄宇等, 2009; Zhang et al., 2012; 蓝先洪等, 2009, 2013), 其中对东海陆架稀土元素的水环境地球化学(王立军等, 1995)、溶解态稀土元素分布(王中良等, 2000)、表层沉积物稀土元素分布(庄克琳等, 2005; 李俊等, 2008)、岩芯沉积物稀土元素地球化学(李双林, 2001; 赵家成等, 2007)和沉积物稀土元素分布与物源关系(张霄宇等, 2009; 徐方建等, 2009a, 2011; 蓝先洪等, 2013)等研究取得了丰硕的成果。然而有关东海外陆架浅海沉积岩芯稀土元素研究尚属一个薄弱环节, 长江、黄河物质对东海陆架晚更新世以来沉积物的影响仍然存在不同的看法(李双林, 2001; 赵家成等, 2007; 徐方建等, 2009a, 2011)。本文研究利用国土资源大调查获得的东海外陆架 SFK-1 孔沉积岩岩芯的稀土元素资料, 探讨晚第四纪沉积物稀土元素分布特征及其与物源变化的关系。

1 采集与测试

1.1 样品采集

青岛海洋地质研究所在国土资源大调查项目实施过程中, 于 2007 年 10 月在东海陆架海域开展了地质钻探工作, 钻孔 SFK-1 位于东海陆架西湖凹陷区(图 1), 具体位置为 $29^{\circ}3.1519'N$, $125^{\circ}15.2978'E$, 水深 88.30 m, 钻孔进尺 82.90 m, 平均取芯率 89.30%; 在室内对该岩芯进行了详细描述和

分样, 以 30~50 cm 间隔取样, 共采集 200 个样品做了稀土元素分析测试。

1.2 分析测试

沉积物在洁净实验室中风干至半干, 样品分析前经 $105^{\circ}C$ 烘干, 研磨后, 过 200 目尼龙网过筛(孔径 0.074 mm), 然后装入牛皮纸样品袋内, 置于干燥器中冷却备用。试样(干样)采用氧化钠熔融后, 用水提取, 稀土元素形成氢氧化物沉淀, 加三乙醇胺掩蔽铁、铝, 加 EDTA 络合钙、钡, 过滤。稀土元素氢氧化物沉淀溶于 2 mol/dm^3 盐酸, 经强酸性阳离子交换树脂分离富集后, 再用 5 mol/dm^3 盐酸洗提, 将淋洗液蒸发、定容后采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 15 个稀土元素含量, 包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y 等元素。稀土元素的测试精度优于 5%, 分析结果可靠。元素测试由国土资源部青岛海洋地质研究所测试中心完成, 实验检测中心样品采用以下几种质量监控方法: (1)使用国家一级标准物质进行测试结果比对; (2)密码样品的双份分析; (3)沉积物样品全分析的百分数加和。

粒度分析由国土资源部青岛海洋地质研究所测试中心采用英国 MALVERN 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪对 398 个样品进行了测试, 分析结果粒级间隔为 $1/4\Phi$ 。

采用低本底的液体闪烁计数方法由青岛海洋地质研究所测试中心年代实验室对 SFK-1 孔做了 1 个样品的 ^{14}C 测定, 样品为深灰色黏土; 另外还在北京大学 AMS 实验室对 2 个贝壳样品进行了 AMS ^{14}C 测试; 由青岛海洋地质研究所测试中心年代实验室采用光释光(OSL)测年法做了 7 个样品(样品为细砂)年代测定。

2 结果与讨论

2.1 稀土元素组成的垂直变化

依据 SFK-1 孔沉积物稀土元素含量的变化, 可将 SFK-1 孔自上而下分为 8 层。

(1)深度为 0.0~5.30 m, 稀土元素含量从上而下有增高趋势(图 2), 稀土总量(ΣREE)介于 143~172 $\mu\text{g/g}$, 平均为 159 $\mu\text{g/g}$ (图 3)。各稀土元素在层中的变化趋势非常一致, 上部含量较低, 向下至中部含量增高, 然后又稍有降低。沉积物上部为深灰色粉砂质砂, 下部为深灰色中细砂(图 3), 粒度平均粒径 ϕ 值介于 2~4.5 之间, 整体粒度趋势向下变粗; 2.78~2.80 m 和 4.56~4.57 m 的 AMS ^{14}C 年龄分别为 $(7255 \pm 45) \text{ a BP}$ 和 $(9420 \pm 40) \text{ a BP}$, 形成于全新世浅海沉积(潮流沙脊沉积)。

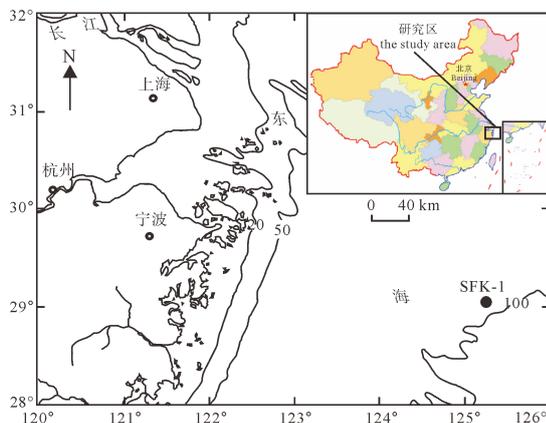


图 1 SFK-1 钻孔位置图
Fig. 1 The location of Core SFK-1

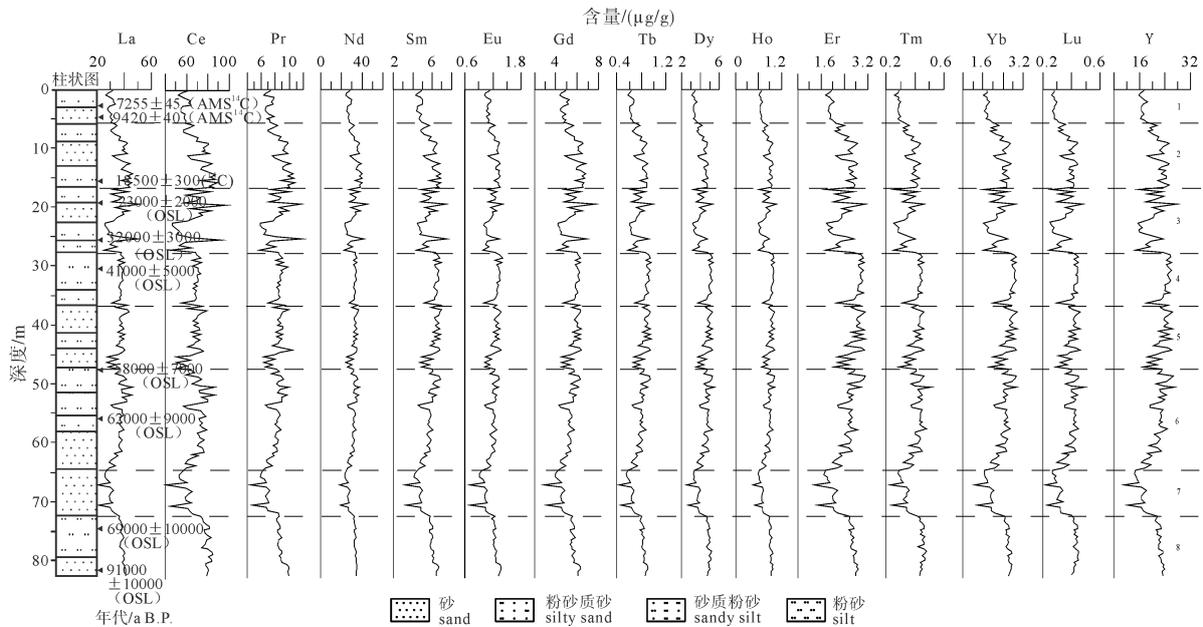


图 2 SFK-1 孔稀土元素含量分布

Fig. 2 The distributions of the REE contents in Core SFK-1

(2)深度范围为 5.30~17.20 m, 稀土元素含量总体上从上而下逐渐增加, Σ REE 介于 161~235 $\mu\text{g/g}$, 平均为 202 $\mu\text{g/g}$; 沉积物为灰色粉砂与灰黑色细砂互层(图 3), 粒度平均粒径 ϕ 值介于 3.0~6.0 之间, 由上往下粒度趋势变细; 15.56~15.70 m 的 ^{14}C 年龄为 (18500 ± 300) a BP, 属末次盛冰期在陆架边缘形成的潮坪沉积。

(3)深度范围为 17.20~28.00 m, 该层稀土元素含量从上而下逐渐减少, Σ REE 介于 134~246 $\mu\text{g/g}$, 平均为 179 $\mu\text{g/g}$; 从上而下波动较大, 上部降至较低值后突然升高, 然后又逐渐降低再升高; 沉积物上部为灰黑色、灰褐色粉砂质砂、黄褐色细砂-中粗砂, 下部沉积物为浅黄褐色、灰褐色粉砂质砂, 粒度平均粒径 ϕ 值介于 1.9~5.5 之间, 平均粒径变化较大(图 3); 19.26~19.40 m 和 25.56~25.70 m 的 OSL 年龄分别为 (23 ± 2) ka BP 和 (32 ± 3) ka BP, 为末次冰期中期的近岸沉积及河口湾沉积; 这期间海面的持续下降, 东海形成以三角洲及海陆交互沉积为主的强制海退体系域(田立柱, 2008)。

(4)深度范围为 28.00~36.70 m, 沉积物为灰色粉砂和黑色粉砂质砂, 平均粒径为 5.5~6.5 ϕ , 比上层段细(图 3); 稀土元素含量从上而下波动较小, Σ REE 介于 190~214 $\mu\text{g/g}$, 平均为 199 $\mu\text{g/g}$; 30.36~30.52 m 的 OSL 年龄为 (41 ± 5) ka BP, 为末次冰期中间冰阶(暖期)浅海沉积。

(5)深度范围为 36.70~47.20 m, 该层稀土元素含量变化较小, 下部含量有所降低, Σ REE 介于 147~219 $\mu\text{g/g}$, 平均为 192 $\mu\text{g/g}$; 沉积物为粉砂和细砂互层, 平均粒径为 3~6 ϕ , 该层段总体表现出向

下部平均粒径逐渐变粗, 结合古生物资料, 为末次冰期早期滨海沉积。

(6)深度范围为 47.20~64.70 m, 该层稀土元素含量变化较大, 该层比上部底部含量明显增加, 下部含量有所降低, Σ REE 介于 159~235 $\mu\text{g/g}$, 平均为 193 $\mu\text{g/g}$; 沉积物上部灰色粉砂-灰黑色细砂, 下部为灰色粉砂夹灰黑色细砂; 平均粒径为 4~6 ϕ 。47.26~47.38 m 和 55.86~55.99 m 的 OSL 年龄分别为 (58 ± 7) ka BP、 (62 ± 9) ka BP, 为末次冰期早期在东海陆架区的滨海沉积和河口-潮坪沉积。

(7)深度范围为 64.70~72.30 m。该层稀土元素含量较低, 变化较小, 降至全孔岩芯的最低值; Σ REE 介于 108~175 $\mu\text{g/g}$, 平均为 152 $\mu\text{g/g}$; 沉积物为灰黑色中细砂, 平均粒径为 3.5~4.5 ϕ 。为末次冰期早期在东海陆架区的河口-三角洲沉积。

(8)深度范围为 72.30~82.90 m, 该层稀土元素含量从上而下有增加趋势, Σ REE 介于 197~217 $\mu\text{g/g}$, 平均为 208 $\mu\text{g/g}$; 沉积物以灰色粉砂为主, 平均粒径为 5.0~6.8 ϕ , ϕ 值上部较小, 表明粒度较粗, 粒度向下逐渐变细(图 3)。74.31~74.40 m 和 81.70~81.78 m 的 OSL 年龄分别为 (69 ± 10) ka BP、 (91 ± 10) ka BP, 对应于温暖且相对稳定的气候环境, 应该是末次间冰期(暖期)晚期在东海陆架区的浅海沉积。

2.2 稀土元素总量变化和 Eu、Ce 异常

稀土元素总量(Σ REE)一般在细粒级的黏土和粉砂质黏土及较粗粒级的砂和粉砂中含量较高。SFK-1 孔沉积物中稀土元素含量的垂向变化研究结果表明(图 3), 稀土元素地球化学特征与不同类型

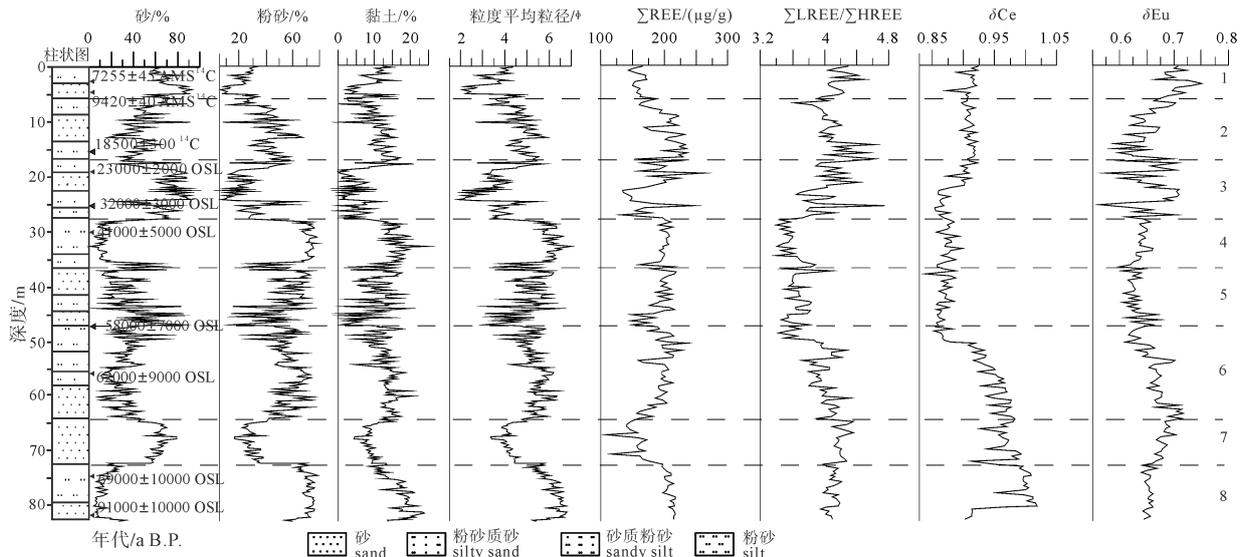


图3 东海外陆架 SFK-1 孔沉积物粒度、 Σ REE、 Σ LREE/ Σ HREE、 δ Eu 和 δ Ce 垂直变化
 Fig. 3 Variations of sediment grain size, Σ REE, Σ LREE/ Σ HREE, δ Eu and δ Ce in the sediments of Core SFK-1 from the outer shelf of the East China Sea

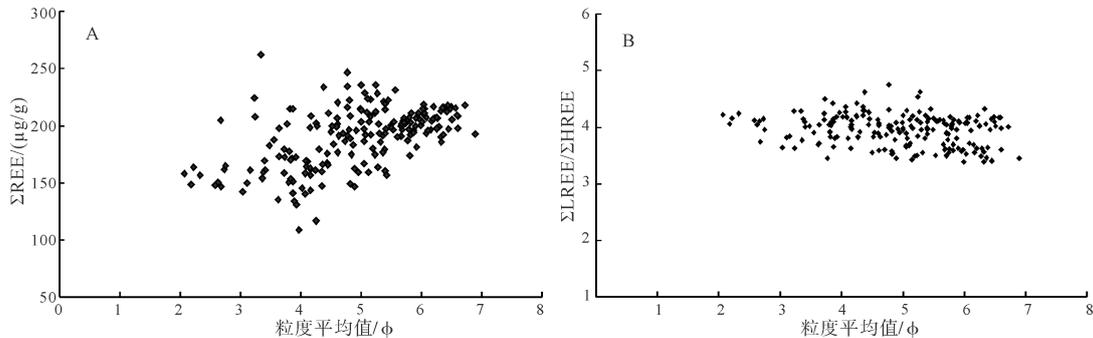


图4 SFK-1 孔 Σ REE、 Σ LREE/ Σ HREE 与平均粒径 ϕ 值的相关图
 Fig. 4 Correlation between Σ REE, Σ LREE/ Σ HREE and average grain diameter(ϕ) of Core SFK-1

沉积物有一定关系,有向细粒沉积物富集的趋势, Σ REE 与细粒沉积物呈正相关关系,而与砂质沉积物呈负相关关系,但这种趋势不是很明显(图 4A),而粒度对轻重稀土元素比值影响很小(图 4B),很可能是由于东海陆架沉积物在经历了搬运、沉积,甚至反复再悬浮、再搬运、再沉积后,其粒径结构相对于黄河、长江入海口沉积物比较单一,这与以往一些研究结论相一致(张霄宇等,2009)。通过对 REE 与 Al_2O_3 和 Mn 进行相关性研究,发现长江口沉积物两者与 HREE 有较为明显的正相关关系(李俊等,2008),REE 与 TiO_2 的线性相关较好,相关系数为 0.90,指示稀土元素主要来自陆源碎屑物质(蓝先洪等,2013)。

在球粒陨石标准化(赵志根,2000)情况下所计算的样品 δ Eu 值在 0.56~0.75 之间,变化范围小且均显示明显的负 Eu 异常。在球粒陨石标准化情况下计算的样品 δ Ce 值在 0.85~1.02 之间,没有明显的 Ce 异常。图 3 中 δ Eu 和 δ Ce 值随深度的变化曲线

表明, δ Eu 和 δ Ce 值随深度的变化与 Σ REE 的变化基本同步,在 Σ REE 含量明显变化的层位, δ Eu 和 δ Ce 值也发生相应明显变化,但 δ Eu 值和 δ Ce 值的变化与 Σ REE 的变化趋势不尽相同;而 δ Eu 值则与 Σ REE 的变化大致呈镜像关系,变化趋势相反。 Σ LREE/ Σ HREE 变化范围在 3.39~4.74,其变化与 Σ REE、 δ Eu 和 δ Ce 值的变化均有所不同, Σ LREE/ Σ HREE 比值在层 4 和层 5 为最低值,反映了 LREE/HREE 变化可能主要与沉积环境和物质来源变化有密切关系, Σ LREE/ Σ HREE 比值可以作为区分不同源区的示踪指标(张霄宇等,2009)。

依据长江、黄河沉积物的分析数据(杨守业等,1999a),采用上地壳(UCC)(蓝先洪等,2009)对稀土元素标准化(图 5)。由图 5 可见长江、黄河沉积物的稀土元素具有相同分布模式,REE 分异不明显,均呈现 Ce 弱的负异常,长江沉积物呈 Eu 弱的正异常,黄河沉积物 Eu 正异常不明显;长江、黄河沉积物的 UCC 标准化模式与世界许多河流一样,均表现为近

直线型, LREE 分异相对稍弱, MREE 不同程度富集; 长江与黄河沉积物中 HREE 分异程度差别较大, 可能反映出不同流域的源岩组成对河流沉积物 REE 组成的控制(杨守业等, 1999b)。长江流域沉积物轻重稀土元素分异程度大于黄河流域沉积物, 长江沉积物 LREE 含量明显地高于黄河沉积物, 这种分布特征应该是代表了长江和黄河两个不同流域的物质来源(张霄宇等, 2009)。因此从 SFK-1 孔岩芯的稀土元素分布模式来看, 28.00~36.70 m 和 36.70~47.20 m 更接近于黄河沉积物稀土元素分布模式, 其他岩芯更接近于长江沉积物稀土元素分布模式。

2.3 物源分析

为了进一步研究东海陆架 SFK-1 孔可能存在的不同物质来源, 利用 $\delta Eu_N - \Sigma REEs$ 关系图和物源判别指数(PI)对该孔的物源进行了初步分析。

SFK-1 孔沉积物 $\delta Eu_N - \Sigma REEs$ ($\Sigma REEs$ 不含 Y 值) 关系图(Jiang et al., 2009)揭示了该孔沉积物物源存在明显差异(图 6)。0~5.30 m、5.30~17.20 m、17.20~28.00 m、47.20~64.70 m 和 72.30~82.90 m 的样品数值基本上落在了长江沉积区, 而 28.00~36.70 m、36.70~47.20 m 和 64.70~72.30 m 的样品大部分数值都落在了黄河沉积物区内。

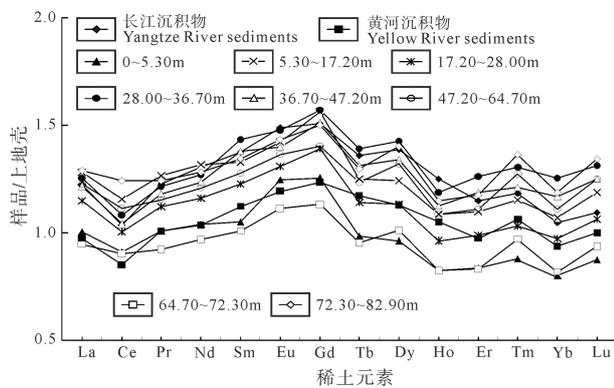


图 5 黄河、长江和 SFK-1 孔沉积物岩芯上地壳标准化稀土元素配分模式

Fig. 5 UCC-normalized REE distribution patterns of samples in the Yellow River, Yangtze River and Core SFK-1

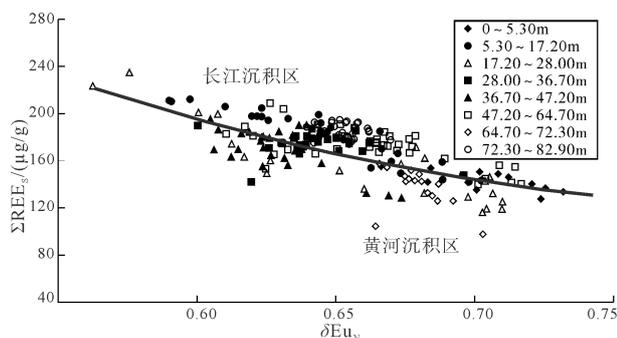


图 6 SFK-1 孔沉积物 $\delta Eu_N - \Sigma REEs$ 关系图

Fig. 6 Correlation between δEu_N and $\Sigma REEs$ for sediments in Core SFK-1

SFK-1 孔中 REE 的含量与沉积物的粒度组成相关性不很明显, 而粒度对轻重稀土元素比值影响很小(图 4B), 稀土元素分布模式表明 SFK-1 孔沉积物主要为陆源组分, 而沉积物粒度变化的层位, 沉积物的组分也发生了变化, 因此 SFK-1 孔沉积物 REE 的变化主要是由沉积物组分的变化造成的。

沉积物中一些重矿物含量对沉积物的化学成分含量有影响(徐方建等, 2009b), 一些特征重矿物(如磷灰石、锆石、榍石、独居石等)可能会显著影响沉积物的 REE 分异特征与配分曲线的形态(蓝先洪等, 2010)。SFK-1 孔沉积物中含有角闪石、磷灰石、石榴石、榍石和锆石等重矿物, 重矿物平均含量在 0.1%~11.2%; SFK-1 孔大部分层段重矿物含量低于 5%, 只是在孔深 5.0 m 以上的沉积物中重矿物含量较高(5.2%~11.2%)。SFK-1 孔在该段 ΣREE 并没有明显变化(图 2, 3), 说明 SFK-1 孔重矿物对 REE 含量没有造成影响。因此可以说 SFK-1 孔沉积物 REE 的变化主要是由沉积物组分的变化造成的。

我们用物源指数(PI)来判别物源。物源指数(PI)的计算如下(谢远云等, 2006; Wang et al., 2007):

$$PI = \frac{\sum |C_{ix} - C_{i1}|}{(\sum |C_{ix} - C_{i1}| + \sum |C_{ix} - C_{i2}|)}$$

式中: i 为元素或两元素之比; C_{ix} 为待判沉积物中元素 i 的含量; C_{i1} 、 C_{i2} 为端员沉积物 1 和端员沉积物 2 中的元素 i 含量, 本文指黄河沉积物与长江沉积物, PI 适合于两端员混合情况。区分端员物源应选择差别较大的元素, 以往研究表明, La、Sm、LREE、HREE 在长江与黄河沉积物之间的含量相对偏差均大于 10%(杨守业等, 1999a, 1999b), 因此本文计算物源指数的元素采用粒度影响较小的 La/Sm 元素对及 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 比值(张霄宇等, 2009)。物源指数(PI)反映的是沉积物之间化学成分总的接近程度, PI 值介于 0 和 1 之间, PI 值小于 0.5, 则表明待判沉积物与端员沉积物 1 化学组成相近; 而 PI 值大于 0.5, 则表明待判沉积物与端员沉积物 2 化学组成相近。

以上分析结果与 SFK-1 孔沉积物岩芯的上地壳标准化稀土元素配分模式结果基本是一致的, 东海陆架 SFK-1 孔沉积物物源主要为长江源, 黄河源对中部层段有一定的影响。物源判别表明(表 1), SFK-1 孔上部 0~28.00 m 沉积物来源主要为长江沉积物, 中部 28.00~47.20 m 沉积物来源主要为黄河沉积物, 下部 47.20 m 以下沉积物来源以长江源为主。

东海陆架 SFK-1 孔沉积物物源指数(PI)研究表明(表 1), SFK-1 孔底部 82.90~73.20 m 沉积物主要为长江源, 该段 74.31~74.40 m 和 81.70~81.78 m 的 OSL 年龄分别为(69±10) ka BP、(91±10) ka BP(图 2),

表 1 东海陆架 SFK-1 孔沉积物物源指数(PI)比较
Table 1 Comparison of provenance index (PI) of sediments in Core SFK-1 from the Earth China Sea

深度/m	PI 黄河	PI 长江	物源判别
0.0~5.30	0.56	0.44	以长江源为主
5.30~17.20	0.57	0.43	以长江源为主
17.20~28.00	0.57	0.43	以长江源为主
28.00~36.70	0.36	0.64	以黄河源为主
36.70~47.20	0.47	0.53	以黄河源为主
47.20~64.70	0.57	0.43	以长江源为主
64.70~72.30	0.58	0.42	以长江源为主
72.30~82.90	0.59	0.41	以长江源为主

相当于晚更新世早期近岸浅海相沉积。源区沉积物环境和物质特征是东海陆架沉积物组成的主要影响因素之一, 1 Ma 以来长江沉积物的稀土元素特征基本没有变化, 且受现代长江沉积物的物源控制(刘引迪等, 2011), 长江上游支流众多, 流域广泛, 各流域源岩的稀土元素特征变化不大(Joniell et al., 2008); 长江沉积物的物质来源复杂, 在流域中上游及下游地区中酸性岩浆岩广泛发育, 与酸性岩有关的 REE 矿产分布较广, 因而长江沉积物中的 REE 含量较高, 形成了长江沉积物中 REE 含量相对黄河流域具有较高的背景值(杨守业等, 1999b)。长江流域相比黄河流域化学风化强烈, 温湿条件下强烈的化学风化可以使 HREE 在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物, 从而比 LREE 形成的更易溶而优先迁移。同时由于碱金属和碱土金属被大量的淋溶带走, 土壤呈酸性, 沉积物沉积环境 pH 值降低使河流中胶体含量较高而吸附较多的 REE, 尤其是 LREE, 导致长江沉积物中 REE 含量高, 并且 LREE 相对 HREE 明显富集(张霄宇等, 2009), 因此长江沉积物的 REE 含量比较高, 具有较强的化学风化作用使得沉积物轻重稀土元素分异较强(图 3, 5)。古长江碎屑物在中中新世晚期时, 首先在东海盆地西湖凹陷北部开始沉积, 在早上新世晚期时, 开始在东海盆地西湖凹陷大量沉积(林志强等, 1990)。东海陆架晚更新世以来沉积物主要来源于长江, 其沉积物化学成分可能部分受到气候和沉积环境的影响(徐方建等, 2009a)。随着海平面下降, 沉积环境转变为河口-三角洲沉积, 沉积物 REE 特征表现仍然为以长江源为主, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值较高(图 3)。47.26~47.38 m 和 55.86~55.99 m 的 OSL 年龄分别为(58±7) ka BP、(62±9) ka BP, 为末次冰期早期滨海沉积和河口-潮坪沉积, 虽然这时沉积物 REE 特征表现仍然为以长江源为主(表 1), 但 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值已开始逐渐降低(图 3), 说明沉积物 REE 特征已有所变化, 反映物质来源已有所改变。

SFK-1 孔中部 47.20~28.00 m 沉积物来源主要为黄河沉积物(表 1), 该段为晚更新世晚期末次冰

期早期滨海沉积和末次冰期中冰阶(暖期)浅海沉积(图 2)。已有研究表明现代黄河向东流入海的格局至少在 1.165 Ma 前就已出现(潘保田等, 2005)。海平面变化是沉积物来源和物质供应量的主要控制因素, 随着海平面下降, 东海陆架沉积物的来源也发生了一定改变, 由主要来源于长江沉积物, 转变为有部分黄河物质影响的沉积; 晚更新世晚期海退时期的古黄河三角洲沉积物重矿物组合研究表明, 受现代黄河沉积物的物源控制(李凡等, 1998), 并且晚更新世晚期黄河已流入黄海陆架区(李凡等, 1998; 蓝先洪等, 2010), 因此这一时期黄河物质可能对东海部分区域已有影响。黄河沉积物主要来自黄土高原, 继承了黄河流域黄土的特征, 黄河流域以蒸发盐和碳酸盐类风化为重, REE 含量相对较低(杨守业等, 1999b); 此外黄河流域物理风化占主导地位, REE 分异作用较弱, 这就决定了沉积物的轻、重稀土元素分异程度(LREE/HREE)相对较弱(图 5), $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值相对较低(图 3)。

SFK-1 孔上部 28.00 m 以上沉积物主要为长江源(表 1), 19.26~19.40 m 和 25.56~25.70 m 的 OSL 年龄分别为(23±2) ka BP 和(32±3) ka BP, 为末次冰期中期的近岸沉积及河口湾沉积; 随着海平面逐渐上升, 东海沉积物的物质来源也相应发生了变化, 由以沉积黄河沉积物为主, 转变为以沉积长江沉积物为主, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值迅速升高(图 3)。到 25 ka BP 的玉木亚间冰期, 海侵在东部海区均有发现, 在长江下游地区海水超过现在岸线直达溧阳, 发生了太湖海侵。SFK-1 孔上部 15.56~15.70 m 的 ^{14}C 年龄为(18500±300) a BP, 属末次盛冰期的潮坪沉积。末次冰期盛冰期(18 ka BP~15 ka BP)海平面下降 130~150 m(蓝先洪, 1995), 东海陆架大多出露成陆地, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值有所下降(图 3), 说明有其他物源影响, 沉积物仍然主要以长江源为主。SFK-1 孔顶部 5.30 m 以上沉积物主要为长江源, 为全新世浅海沉积, 东海陆架全新世海侵逐步由东南向西北扩展, 该孔海相性增强, 沉积物来源变化不大, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值迅速上升后略有下降, 由于老

黄河口物质在黄海沿岸流作用下更多沉积物被搬运至黄东海陆架(蓝先洪等, 2005), 在 7.6~2.6 ka 期间黄河对东海内陆架泥质沉积物物质来源可能有一定影响(徐方建等, 2011)。

3 结论

1) 东海陆架 SFK-1 孔稀土元素含量及比值变化表现出一定的分层性, 垂向上自上而下可分为 8 层, 表明稀土元素含量特征对于地层划分有良好的指示意义。

2) 稀土元素分配模式表明 SFK-1 孔沉积物物源主要为长江和黄河, REE 判别图解和物源判别指数(PI)揭示 SFK-1 孔上部 28.00 m 以上沉积物以长江源为主, 中部 28.00~47.20 m 沉积物以黄河源为主, 下部 47.20~82.90 m 沉积物以长江源为主。

3) 通过 SFK-1 孔稀土元素分布模式、Eu 异常与稀土元素总量关系($\delta Eu_N - \Sigma REEs$)判别图解和物源判别指数(PI)的综合研究, 表明沉积物来源主要为长江沉积物, 长江从晚更新世早期到现代对东海陆架起着主要作用, 而黄河物质在晚更新世晚期已开始对东海陆架沉积作用有一定影响。

参考文献:

- 古森昌, 陈绍谋, 吴必豪, 李松筠, 陈永忠. 1989. 南海表层沉积物稀土元素地球化学[J]. 热带海洋, 8(2): 93-101.
- 蓝先洪, 王红霞, 张志珣, 林振宏, 李日辉, 王中波. 2006. 南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系[J]. 中国稀土学报, 24(6): 745-749.
- 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 张志珣. 2009. 南黄海 NT1 孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. 地球化学, 38(2): 123-132.
- 蓝先洪, 张训华, 张志珣. 2005. 南黄海沉积物的来源及运移研究[J]. 海洋湖沼通报, (4): 53-60.
- 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 丁东. 2010. 南黄海 NT2 孔沉积物物源研究[J]. 沉积学报, 28(6): 1182-1189.
- 蓝先洪, 张志珣, 田振兴, 郭兴伟, 徐晓达. 2013. 长江口外海域表层沉积物稀土元素的含量分布与物质来源分析[J]. 应用海洋学学报, 32(1): 14-29.
- 蓝先洪. 1995. 晚更新世末期陆架的古环境研究[J]. 海洋地质动态, (5): 6-8.
- 李凡, 张秀荣, 李永植, 李本兆. 1998. 南黄海埋藏古三角洲[J]. 地理学报, 53(3): 238-244.
- 李俊, 汪霆, 弓振斌, 李云春, 温裕云. 2008. 长江口表层沉积物中稀土元素地球化学特征[J]. 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[J]. 海洋学报, 23(3): 127-132.
- 林志强, 蔡洪正. 1990. 古长江碎屑物进入东海盆地时间探讨[J]. 上海地质, (2): 26-34.
- 刘引迪, 李长安, 袁胜元. 2011. 江汉盆地周老孔 0~108 m 沉积

- 物的稀土元素特征及其物源判别[J]. 地质科技情报, 30(1): 47-50.
- 潘保田, 王均平, 高红山, 管清玉, 王勇, 苏怀, 李炳元, 李吉均. 2005. 河南扣马黄河最高级阶地地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. 科学通报, 50(3): 255-261.
- 庞守吉, 叶思源, 苏新, 赵广明. 2008. 黄河三角洲滨海湿地表层土壤稀土元素分布特征[J]. 地球学报, 29(5): 607-612.
- 石学法, 陈丽荣, 马建国, 柴之芳. 1996. 西菲律宾海沉积物稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 16(3): 260-267.
- 田立柱. 2008. 末次盛冰期以来中国东部陆架层序地层研究现状[J]. 地质调查与研究, 31(4): 328-332.
- 王金土. 1990. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 19(1): 44-53.
- 王立军, 章申, 张朝生, 李岫霞. 1995. 长江中下游稀土元素的水环境地球化学特征[J]. 环境科学学报, 15(1): 57-65.
- 王中良, 刘丛强. 2000. 长江口水体混合过程中溶解态稀土元素分布特征[J]. 科学通报, 45(12): 1322-1328.
- 吴明清, 王贤觉. 1991. 东海沉积物稀土和微量元素[J]. 地球化学, 20(1): 40-46.
- 谢远云, 何葵, 周嘉, 康春国. 2006. 哈尔滨沙尘暴的化学特征及其物质源探讨[J]. 地理研究, 25(2): 255-261.
- 徐方建, 李安春, 李铁刚, 陈世悦, 操应长, 董春梅, 邱隆伟. 2011. 中全新世以来东海内陆架泥质沉积物来源[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(1): 1-6.
- 徐方建, 李安春, 万世明, 刘建国, 徐兆凯, 肖尚斌, 王金丽. 2009b. 东海内陆架陆源物质矿物组成对粒度和地球化学成分制约的[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(4): 613-622.
- 徐方建, 李安春, 徐兆凯, 肖尚斌, 万世明, 刘建国. 2009a. 东海内陆架沉积物稀土元素地球化学特征及物源意义[J]. 中国稀土学报, 27(4): 574-582.
- 杨守业, 李从先. 1999a. 长江和黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(2): 19-26.
- 杨守业, 李从先. 1999b. 长江和黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学, 28(4): 374-380.
- 张霄宇, 张富元, 高爱根, 章伟艳, 徐绮阳. 2009. 稀土元素在长江口及邻近陆架表层沉积物中的分布及物源示踪研究[J]. 中国稀土学报, 27(2): 282-288.
- 赵家成, 肖尚斌, 张国栋, 李旭东, 李安春. 2007. 闽浙沿海岸泥质沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 26(3): 7-12.
- 赵志根. 2000. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响——兼论球粒陨石标准[J]. 标准化报道, 21(3): 15-16.
- 庄克琳, 毕世普, 苏大鹏. 2005. 长江水下三角洲表层沉积物稀土元素特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 25(4): 15-22.

References:

CHEN Zhi-hua, GAO Ai-guo, LIU Yan-guang, SUN Hai-qing, SHI

- Xue-fa, YANG Zuo-sheng. 2003. REE geochemistry of surface sediments in the Chukchi Sea[J]. *Science in China(D)*, 46(6): 603-611.
- GU Sen-chang, CHEN Shao-mou, WU Bi-hao, LI Song-jun, CHEN Yong-zhi. 1989. REE geochemistry in surface sediments of South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 8(2): 93-101(in Chinese with English abstract).
- JIANG Fu-qing, ZHOU Xiao-jing, LI An-chun, LI Tie-gang. 2009. Quantitatively distinguishing sediments from the Yangtze River and the Yellow River using δEu_N - ΣREEs plot[J]. *Science in China (Series D)*, 52(2): 232-241.
- JONIELL B B, YOUNGSOOK H, SEULGI M, HYEONJEONG N. 2008. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East[J]. *Chemical Geology*, 254(1/2): 52-72.
- LAN Xian-hong. 1995. Paleo-environment study from continental shelf of the East China Sea during the last period of Late Pleistocene[J]. *Marine Geology Letters*, (5): 6-8(in Chinese).
- LAN Xian-hong, WANG Hong-xia, ZHANG Zhi-xun, LIN Zhen-hong, LI Ri-hui, WANG Zhong-bo. 2006. Distributions of Rare Earth Elements and Provenance Relations in the Surface Sediments of the South Yellow Sea[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 26(6): 745-749(in Chinese with English abstract).
- LAN Xian-hong, ZHANG Xian-jun, ZHAO Guang-tao, ZHANG Zhi-xun. 2009. Distributions of rare earth elements in sediments from core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J]. *Geochimica*, 38(4): 123-132(in Chinese with English abstract).
- LAN Xian-hong, ZHANG Xun-hua, ZHANG Zhi-xun. 2005. Material sources and transportation of sediments in the Southern Yellow Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 53-60(in Chinese with English abstract).
- LAN Xian-hong, ZHANG Zhi-xun, LI Ri-hui, DING Dong. 2010. Provenance Study of Sediments in Core NT2 of the South Yellow Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1182-1189(in Chinese with English abstract).
- LAN Xian-hong, ZHANG Zhi-xun, TIAN Zhen-xing, GUO Xing-wei, XU Xiao-da. 2013. Content distributions and source analysis of rare earth elements in surface sediments off Yangtze River estuary[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 32(1): 14-29(in Chinese with English abstract).
- LI Fan, ZHANG Xiu-rong, LI Yong-zhi, LI Ben-zhao. 1998. Buried Paleo-delta in the South Yellow Sea[J]. *Acta Geographica Sinica*, 53(3): 238-244(in Chinese with English abstract).
- LI Jun, WANG Ting, GONG Zhen-bin, LI Yun-chun, WEN Yu-yun. 2008. Geochemical behaviors of rare earth elements in sediments of the estuary of Yangtze River[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 27(3): 356-361(in Chinese with English abstract).
- LI Shuang-lin. 2001. Geochemistry of rare earth element in sediments at HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(3): 127-132(in Chinese with English abstract).
- LIM D I, JUNG H S, CHOI J Y, YANG S Y, AHN K S. 2006. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: grain-size normalization and sediment provenance[J]. *Continental Shelf Research*, 26(1): 15-24.
- LIN Zhi-qiang, CAI Hong-zheng. 1990. An approach to the initial time of the clastic material of the ancient Yangtze River entering East China Sea basin[J]. *Shanghai Geology*, (2): 26-34(in Chinese with English abstract).
- LIU Yin-di, LI Chang-an, YUAN Sheng-yuan. 2011. Geochemistry of REE and Provenance of Sediments from 0-108 m Zhoulao Borehole in Jiangnan Plain[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(1): 47-50(in Chinese with English abstract).
- PAN Bao-tian, WANG Jun-ping, GAO Hong-shan, GUAN Qing-yu, WANG Yong, SU Huai, LI Bing-yuan, LI Ji-jun. 2005. Paleomagnetic age of the highest terrace of the Yellow River and its indicator of the Yellow River passing through in Kouma, Henan province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(3): 255-261(in Chinese).
- PANG Shou-ji, YE Si-yuan, SU Xin, ZHAO Guang-ming. 2008. REE Distribution Characteristics of Coastal Wetlands Surface Soil from the Yellow River Delta[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5): 607-612(in Chinese with English abstract).
- SHI Xue-fa, CHEN Li-rong, MA Jiang-guo, CAI Zhi-fang. 1996. REE Geochemistry of Sediments from West Philliping Sea[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(3): 260-267(in Chinese with English abstract).
- TIAN Li-zhu. 2008. Current Research of Sequence Stratigraphy in Eastern China Shelf since the Last Glacial Maximum[J]. *Geological Survey and Research*, 31(4): 328-332(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-xia, ZHANG Xian-jun, LAN Xian-hong, ZHANG Zhi-xun, LIN Zhen-hong, ZHAO Guang-tao. 2007. Geochemistry Characteristics of Sediment and Provenance Relations of Sediments in Core NT1 of the South Yellow Sea[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 18(4): 287-298.
- WANG Jin-tu. 1990. REE Geochemistry of surface sediments from the Yellow Sea of China[J]. *Geochimica*, 19(1): 44-53(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-jun, ZHANG Shen, ZHANG Chao-sheng, LI Xiu-xia. 1995. Aquatic environmental geochemistry characteristics of rare earth elements of in the middle lower reaches of Chang-

- jiang(Yangtze) River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 15(1): 57-65(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhong-liang, LIU Cong-qiang. 2000. Dissolved REE distribution in Yangtze River estuarine water mixing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(12): 1322-1327(in Chinese).
- WU Ming-qing, WANG Xian-jue. 1991. Rare-earth and trace elements in the East China Sea sediments[J]. *Geochimica*, 20(1): 40-46(in Chinese with English abstract).
- XIE Yuan-yun, HE Kui, ZHOU Jia, KANG Chun-guo. 2006. Chemical characteristic of duststorm deposits in Harbin and its matter origin[J]. *Geographical Research*, 25(2): 255-261(in Chinese with English abstract).
- XU Fang-jian, LI An-chun, LI Tie-gang, CHEN Shi-yue, CAO Ying-chang, DONG Chun-mei, QIU Long-wei. 2011. Provenance of mud sediments in the inner shelf of East China Sea since mid-Holocene[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 35(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- XU Fang-jian, LI An-chun, WAN Shi-ming, LIU Jian-guo, XU Zhao-kai, XIAO Shang-bin, WANG Jin-li. 2009b. Terrestrial Mineral Constrains on the Grain-Size Distribution and Geochemical Composition of Sediments in the Inner Shelf of the East China Sea[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(4): 613-622(in Chinese with English abstract).
- XU Fang-jian, LI An-chun, XU Zhao-kai, XIAO Shang-bin, WAN Shi-ming, LIU Jian-guo. 2009a. Rare Earth Element Geochemistry in Inner Shelf of the East China Sea and Implication for Sediment Provenance[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 27(4): 574-582(in Chinese with English abstract).
- YANG Shou-ye, LI Cong-xian. 1999a. Characteristic element composition the Yangtze and their Yellow River sediments and geological background[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(2): 19-26(in Chinese with English abstract).
- YANG Shou-ye, LI Cong-xian. 1999b. REE Geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments[J]. *Geochimica*, 28(4): 374-380(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao-yu, ZHANG Fu-yuan, CHEN Xin, ZHANG Wei-yan, DENG Han. 2012. REEs fractionation and sedimentary implication in surface sediments from eastern South China Sea[J]. *Journal of Rare Earths*, 30(6): 614-620.
- ZHANG Xiao-yu, ZHANG Fu-yuan, GAO Ai-gen, ZHANG Wei-yan, XU Qi-yang. 2009. Distribution and source tracing implication of rare earth elements in surface sediments of Changjiang River estuary and adjacent continental shelf[J]. *Journal of Chinese Rare Earth Society*, 27(2): 282-288(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jia-cheng, XIAO Shang-bin, ZHANG Guo-dong, LI Xu-dong, LI An-chun. 2007. REE Geochemistry of the Mud off Zhejiang-Fujian Provinces[J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(3): 7-12(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi-gen. 2000. Effect of Different Chondrite on the Parameter of Rare earth Elements[J]. *Reporting of Standardization*, 21(3): 15-16(in Chinese with English abstract).
- ZHUANG Ke-lin, BI Shi-pu, SU Da-peng. 2005. Rare earth elements in surface sediments in the subaqueous Yangtze Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(4): 15-22(in Chinese with English abstract).