

doi:10.3799/dqkx.2016.038

渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别

蓝先洪^{1,2}, 李日辉^{1,2}, 密蓓蓓^{1,2}, 张志珣^{1,2}, 郭兴伟^{1,2}, 黄龙^{1,2}

1. 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
2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 为了探讨渤海东部和黄海北部稀土元素分布特征及其影响因素, 对渤海东部和黄海北部 138 个表层沉积物样品进行电感耦合等离子体质谱法分析. 结果表明: 渤海东部和黄海北部沉积物的配分模式与中国黄土的接近, 与周边的鸭绿江、黄河等河流输入物质也有相似性, 表明研究区沉积物主要来自于周边大陆. 沉积物物源判别结果显示: 山东半岛近岸及其西南部沉积物主要来源于黄河, 该区域沉积物分布受山东半岛沿岸流及近岸潮流影响; 研究区东部沉积物稀土元素组成特征与鸭绿江沉积物组成相近, 表明研究区东部沉积物可能由鸭绿江供应; 研究区西北部沉积物主要来源于黄河及辽宁沿岸物质输入, 局部有滦河、六股河物质存在; 研究区东南部物质主要来源于黄河. 对沉积物稀土元素百分含量及参数特征值进行了 Q 型聚类分析, 将研究海域沉积物划分为 4 个不同的区域, 分别为北黄海东部区域 (I)、山东半岛近岸周边区域 (II)、渤海东部中部区域 (III) 及研究区的西北部与东南部分布区 (IV).

关键词: 稀土元素; 分布特征; 表层沉积物; 渤海东部; 黄海北部; 地球化学.

中图分类号: P595; P736.4

文章编号: 1000-2383(2016)03-0463-12

收稿日期: 2015-07-11

Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas

Lan Xianhong^{1,2}, Li Rihui^{1,2}, Mi Beibei^{1,2}, Zhang Zhixun^{1,2}, Guo Xingwei^{1,2}, Huang Long^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: Rare earth elements (REE) were analyzed by ICP-MS analysis in 138 surface sediments samples collected from in the eastern Bohai and northern Yellow Seas, China. The results indicated that the REE UCC normalization distribution pattern in surface sediments in the eastern Bohai and northern Yellow Seas was similar to that in Chinese loess, and also those of coastal rivers including the Yalu River, the Yellow River and other rivers, indicating that the sediments in study area were mainly derived from the mainland substance. Provenance discrimination results showed that the sediments in the Shandong Peninsula and southwestern shore were mainly derived from the Yellow River, the area affected by the coastal current of the Shandong Peninsula and near shore tidal current; REE composition characteristics of sediment in the eastern part in the study area were similar to the Yalu River sediments, indicating that the sediments of the eastern study area may be supplied by the Yalu River. Sediments of the western part of the study area were mainly derived from the Yellow River and Liaoning coast material input, the local presence of the Luanhe River, Liuguhe River substance. The material of southeast in the study area mainly derived from the Yellow River. The REE contents and parameters of characteristic value were analyzed by the Q cluster analysis, the study area can be divided into four different regions. Namely region in the eastern part of the North Yellow Sea (I), the Shandong

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41206053); 国家自然科学基金重点基金项目 (No. 41330964); 国土资源部海洋区域地质调查项目 (Nos. GZH200800501, GZH201400205, GZH201400206).

作者简介: 蓝先洪 (1958-), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积和沉积地球化学研究. E-mail: lanxh@qingdaonews.com

引用格式: 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等, 2016. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别. 地球科学, 41(3): 463-474.

Peninsula inshore surrounding area (II), middle area in the eastern Bohai Sea (III) and distributions in the northwest and southeast of the study area (IV).

Key words: rare earth elements; distribution; surface sediments; eastern Bohai Sea; northern Yellow Sea; geochemistry.

0 引言

稀土元素(REE)具有非常相似且系统差异的地球化学性质,它们的迁移和组合规律是一定地质和地球物理情况的反映(丁士明等,2005).由于在风化作用中稀土元素发生的各种分异作用在其迁移过程中被消除,在海洋沉积环境中稀土成分基本无重大变化,其分布模式保持不变(古森昌等,1989).因此,研究海洋沉积物的稀土元素地球化学特征,对解决海洋地质学中的沉积物来源(Sholkovitz *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2009; 徐方建等,2009; 赵梦等,2013)、地层划分(鲁洪波和姜在兴,1999; 蒋富清等,2008; 蓝先洪等,2009)和古海洋演化(Holser *et al.*, 1997; 冯旭文等,2011)等方面具有重要的意义.

目前许多作者已对黄海(王金土,1990; 蓝先洪等,2006; Yang and Youn, 2007)、东海(王贤觉等,1982; 吴明清和王贤觉,1991; Zhang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012)、台湾浅滩(吴明清,1983)和南海(古森昌等,1989; 朱赖民等,2007; 刘建国等,2010)等中国海区沉积物稀土元素地球化学特征做过较为系统地分析.渤海作为我国半封闭的内海,直接接受巨量的黄河泥沙.这些泥沙在沿岸流和潮流作用下,经过渤海海峡黄河泥沙进入黄海,一部分在山东半岛北岸近海和北黄海中部气旋型涡流区发生沉积,其余的绕过成山头进入南黄海(蓝先洪等,2005),因此渤海东部与黄海北部的沉积作用是紧密相连的.相对中国其他边缘海,渤海和黄海北部表层沉积物稀土地球化学特征的研究较为零散,赵一阳和鄢明才(1994)对渤海做了少量表层沉积物样品稀土元素分析,黄海稀土元素研究主要集中在黄海南部海域(王金土,1990; 蓝先洪等,2006; 朱赖民等,2006; Yang and Youn, 2007)和山东半岛东北部、东部近岸海域(孔祥淮等,2007; 窦衍光等,2012).本文基于渤海东部和黄海北部海域 138 个站点(图 1)表层沉积物样品稀土元素分析资料,将渤海东部和黄海北部稀土元素地球化学作连片分析,探讨其物质来源的变化.

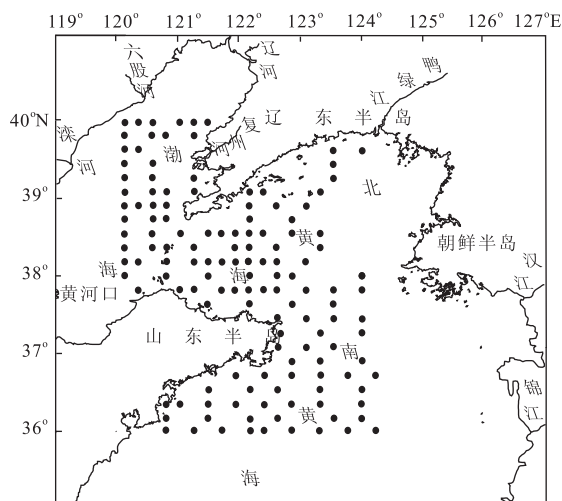


图 1 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素取样站分布

Fig. 1 Location of the sampling stations of the rare earth elements (REE) in the surface sediment from the eastern Bohai and northern Yellow Seas

1 材料与方法

1.1 样品采集

2008 年和 2009 年在渤海东部和黄海北部海域分别进行了表层沉积物取样,样品采用箱式取样器采集,箱式取样器吊上来后,轻轻放置于甲板上,由取样人员打开箱式取样器的张口,将样品装入干净的聚乙烯袋内,在进行详细描述之后,妥善保存在冰柜内并尽快运回实验室分析,对 138 个站点样品作了稀土元素分析测试(图 1).

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 °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/dm³ 盐酸,经强酸性阳离子交换树脂分离富集后,再用 5 mol/dm³ 盐酸洗涤,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 个稀土元素及微量元素含量,包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、

Lu、Y 和 Co、Th、Rb、Cr 等元素。元素 Al、Ti、Ca、Mg、Zr 和 Sr 的测试采用压片法,将试样用混合熔剂熔融,加少量溴化锂作为脱模剂,以硝酸铵为氧化剂,试样与熔剂的重量比为 1:12。在熔样机上于 1050℃熔融,制成玻璃样片,用熔片法-X 射线荧光光谱仪(XRF)进行测定。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。经审核样品检测结果的合格率为 100%。为了监控测试精度和准确度,对元素分析分别进行了若干样品的重复分析与标样分析,经检测分析元素含量对误差小于 5%,分析结果可靠。

粒度分析同样由青岛海洋地质研究所海洋地质实验检测中心完成,采用 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,仪器测量范围 0.02~2000 μm, 粒度分辨率为 0.01 φ。样品首先去除有机质、钙质胶结物及生物壳体,然后加入偏磷酸钠用超声波振荡使样品分散后上机测试。对 228 个样品进行了粒度分析,分析结果间隔为 1/2 φ~1/4 φ。

2 分析结果

2.1 稀土元素分布特征

共测试了 15 个稀土元素,包括铈系元素和钇元素。研究区表层沉积物的 REE 含量见表 1。研究区沉积物中总稀土平均含量为 179.7 μg/g,高于中国陆架海底沉积物平均含量(156 μg/g,赵一阳等,1990),比较接近于中国黄土的 ΣREE 值(185 μg/g),而与深海沉积物中稀土元素的 ΣREE 值(200 μg/g,据吴明清,1983)相差较大。

稀土元素在研究区域的分布趋势表现为由成山角沿山东半岛向西北方向海域、以及由山东半岛东南部沿近岸向西南海域逐渐减少。研究区西北角、东部、东南部和辽东半岛东南部局部海域为 ΣREE 高值区,渤海研究区中部、渤海海峡、研究区西南部和成山角以东海域为 ΣREE 低值区(图 2)。

轻重稀土元素的含量之比(ΣLREE/ΣHREE)为 2.55~6.07(LREE 元素包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu;HREE 元素包括 Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y)。ΣLREE/ΣHREE 比值分布特点是低值区分布在研究区西部、山东半岛北部及东部海域,而高值区主要分布在研究区东部、东南

部、辽东半岛东南部,东部区域高值区基本上与东南部高值区连为一体(图 3)。

表层沉积物表现出具有明显的铕负异常,本文采用前人提出的球粒陨石平均值(赵志根,2000),计算的样品 δEu 值的变化范围为 0.51~0.80(图 4),平均为 0.67,呈明显的负异常,表明相对于球粒陨石沉积物已经产生明显的分异,分异程度接近大陆地壳。δEu 值在山东半岛东南部海域、渤海海峡和渤海东部中部区域,铕负异常较低;在山东半岛东部海域和北黄海中部相对铕负异常较高。在球粒陨石标准化情况下计算的样品 δCe 值在 0.86~1.03 之间,平均为 0.94,没有明显的 Ce 异常。

2.2 稀土元素的富集及其粒度效应

根据前人(王金土,1990)的研究成果,认为稀土元素主要富集于<0.02 mm 粒级中,即粉砂、黏土中。该区域稀土元素分布也基本符合这种规律(表 2),稀土元素富集于粉砂和粉砂质黏土中,ΣREE 与粉砂和黏土的相关系数均为 0.53。以黏土和粉砂为主的沉积物中含量高于 200 μg/g;以砂为主的沉积物中含量较低,低于 170 μg/g(图 2)。表层沉积物中稀土元素含量分布有向细粒沉积物富集的趋势,ΣREE 与细粒沉积物呈低度正相关,而与砂质沉积物呈低度负相关,主要富集于细粒沉积物中,在粉砂和黏土沉积物无明显区别(表 2)。ΣLREE/ΣHREE 值与粉砂和黏土的相关系数明显减弱,与砂质沉积物负相关也降低,反映出粒度对 ΣLREE/ΣHREE 值影响较小。

除细粒沉积物外,表 2 表明 ΣREE 与 Ti 的相关系数为 0.60,稀土富集与重矿物有密切关系,重矿物是稀土的重要“载体”之一。沉积物粒度对稀土元素含量的制约是相对的,某些砂质沉积物中稀土元素含量较高,可能与富稀土重矿物组分的存在有关(高爱国等,2003);某些细粒沉积物中稀土元素含量较低,可能受到生物碎屑的稀释作用(赵一阳和鄢明才,1994)。ΣREE 与 Zr 元素无相关性(表 2),表明研究区稀土元素富集与锆石关系较弱;ΣREE 与 Th 元素呈显著正相关(表 2),表明研究区稀土元素富集与独居石、榍石、磷灰石等重矿物关系密切,研究区榍石、磷灰石含量可达 1%~4%(李艳等,2011;王利波等,2014),而榍石、磷灰石含量与沉积物粒度并未表现出良好的相关性(王利波等,2014),这与重矿物主要富集于粉砂质沉积物中,且随着沉积物粒径变大或变小没有表现出明显相关性的结果相一致(李艳等,2011)。

表 1 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素含量($\mu\text{g/g}$)Table 1 Concentrations of REE in surface sediments from the eastern Bohai and northern Yellow Seas ($\mu\text{g/g}$)

| 元素 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | ΣREE |
|-----|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|
| 最大值 | 48.9 | 102.0 | 11.50 | 41.9 | 7.14 | 1.37 | 6.07 | 0.92 | 5.19 | 1.05 | 2.97 | 0.47 | 2.99 | 0.47 | 27.5 | 247.6 |
| 最小值 | 19.5 | 38.4 | 4.65 | 17.2 | 3.13 | 0.70 | 2.61 | 0.41 | 2.33 | 0.45 | 1.16 | 0.16 | 1.01 | 0.15 | 11.6 | 115.0 |
| 平均值 | 33.5 | 66.6 | 7.86 | 29.2 | 5.25 | 1.08 | 4.56 | 0.70 | 3.92 | 0.80 | 2.21 | 0.34 | 2.20 | 0.35 | 21.1 | 179.7 |

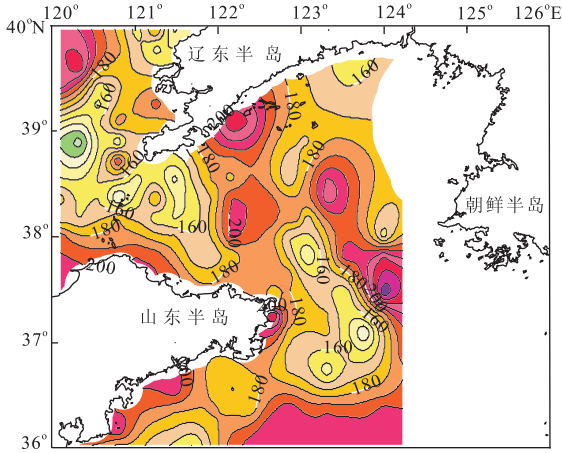


图 2 渤海东部和黄海北部表层沉积物 ΣREE 分布($\mu\text{g/g}$)
Fig. 2 Distribution of ΣREE in surface sediments from the eastern Bohai and northern Yellow Seas

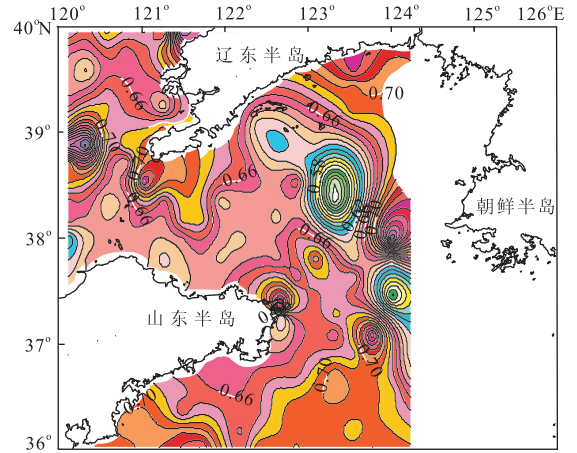


图 4 表层沉积物中 δEu 值分布
Fig. 4 Distribution of δEu in surface sediments

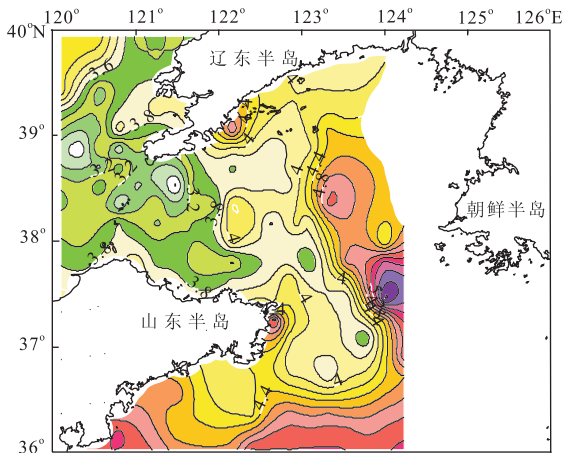


图 3 渤海东部和黄海北部海域沉积物 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 分布
Fig. 3 Distribution of $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ in surface sediments from the eastern Bohai and northern Yellow Seas

2.3 稀土元素的配分模式

稀土元素的配分模式主要受物源的影响,可利用沉积物中稀土元素不同的配分模式来揭示沉积物物质来源和物源区特征等(古森昌等,1989;朱赖民等,2007).稀土元素的配分模式本文采用上地壳(UCC)(Taylor,1985)对稀土元素标准化(图 5),

长江、黄河沉积物(Yang *et al.*, 2002)与鸭绿江、汉江和锦江沉积物(Yang *et al.*, 2003)稀土元素具有相同分布模式,但锦江和汉江沉积物稀土元素的分布模式明显富集 LREE,相对亏损 HREE(图 5),鸭绿江沉积物稀土元素分异较弱,LREE 和 MREE 相对富集,而长江和黄河的 REE 分异不明显,均呈现弱的 Ce 负异常和弱的 Eu 正异常.

渤海东部和黄海北部稀土元素平均值的上地壳(UCC)(Taylor,1985)标准化配分模式(图 5)与中国黄土(Wu *et al.*, 1991)接近,研究区西部、西南站位表层沉积物稀土元素配分模式与黄河、长江相似,REE 分异不明显;而北黄海东部表层沉积物稀土元素的配分模式更富集 LREE(图 5),与鸭绿江沉积物稀土元素配分模式相似.

3 讨论

3.1 稀土元素组成的制约因素

沉积物中 REE 组成主要受沉积物源区的源岩、粒度、矿物组成、化学风化和成土作用强弱以及人类活动等控制(杨守业等,2007),源岩是制约沉积物 REE 组成的主要因素,风化作用、粒度及重矿物组成对其的影响相对较弱(严杰等,2010).虽然一些研

表2 渤海东部和黄海北部表层沉积物各组份的相关关系

Table 2 Correlation coefficients between the elements of surface sediment in the eastern Bohai and northern Yellow Seas

| ΣREE | $\frac{\Sigma\text{LREE}}{\Sigma\text{HREE}}$ | 砂 | 粉砂 | 黏土 | Al_2O_3 | CaO | TiO_2 | MgO | TFe_2O_3 | Zr | Th | Cr | Co | Rb | Sr | |
|---|---|---------|---------|---------|-------------------------|---------|----------------|---------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| ΣREE | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\frac{\Sigma\text{LREE}}{\Sigma\text{HREE}}$ | 0.73** | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| 砂 | -0.56** | -0.34** | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| 粉砂 | 0.53** | 0.29** | -0.98** | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| 黏土 | 0.53** | 0.41** | -0.87** | 0.76** | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| Al_2O_3 | 0.64** | 0.56** | -0.76** | 0.70** | 0.79** | 1.00 | | | | | | | | | | |
| CaO | -0.21* | -0.21* | -0.10 | 0.11 | 0.06 | -0.32** | 1.00 | | | | | | | | | |
| TiO_2 | 0.60** | 0.33** | -0.92** | 0.93** | 0.73** | 0.77** | -0.06 | 1.00 | | | | | | | | |
| MgO | 0.57** | 0.43** | -0.88** | 0.84** | 0.84** | 0.89** | 0.06 | 0.84** | 1.00 | | | | | | | |
| TFe_2O_3 | 0.65** | 0.48** | -0.83** | 0.76** | 0.85** | 0.84** | 0.05 | 0.77** | 0.95** | 1.00 | | | | | | |
| Zr | -0.09 | -0.13 | 0.30** | -0.24** | -0.37** | -0.43** | -0.21* | -0.14 | -0.51** | -0.52** | 1.00 | | | | | |
| Th | 0.91** | 0.73** | -0.66** | 0.62** | 0.64** | 0.81** | -0.26** | 0.71** | 0.74** | 0.76** | -0.18* | 1.00 | | | | |
| Cr | 0.61** | 0.44** | -0.91** | 0.87** | 0.84** | 0.89** | -0.05 | 0.90** | 0.95** | 0.92** | -0.38** | 0.79** | 1.00 | | | |
| Co | 0.66** | 0.50** | -0.84** | 0.77** | 0.86** | 0.89** | -0.04 | 0.79** | 0.94** | 0.97** | -0.50** | 0.78** | 0.93** | 1.00 | | |
| Rb | 0.66** | 0.59** | -0.60** | 0.52** | 0.71** | 0.92** | -0.35** | 0.59** | 0.79** | 0.82** | -0.52** | 0.80** | 0.78** | 0.87** | 1.00 | |
| Sr | -0.32** | -0.29** | 0.34** | -0.34** | -0.28** | -0.57** | 0.65** | -0.42** | -0.41** | -0.36** | 0.08 | -0.47** | -0.45** | -0.41** | -0.54** | 1.00 |

注:使用PASS统计软件分析:**代表双侧检验在0.01水平上显著相关;*代表在0.05水平上显著相关

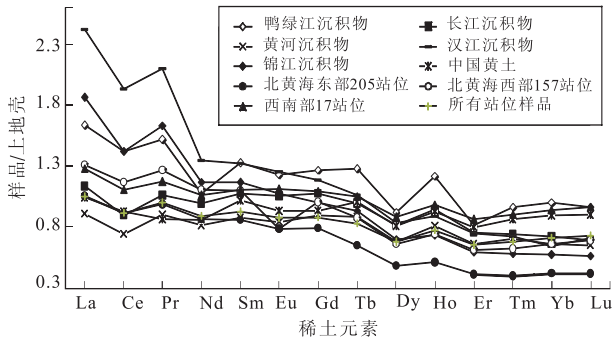


图5 黄河、长江、锦江、汉江和表层沉积物上地壳标准化稀土元素配分模式

Fig. 5 UCC-normalized REE distribution patterns of samples in Yellow River, Yangtze River, Keum River, Han River and surface sediments

长江、黄河数据引自 Yang *et al.* (2002);鸭绿江、汉江、汉江数据引自 Yang *et al.* (2003)

究揭示,化学风化强烈时,沉积物的REE组成会出现明显的分异,而明显偏离源岩组成,但是不少学者也认为,沉积物的物源仍然是控制REE组成的最重要因素(杨守业等,2007),因而REE常用作沉积物的物源示踪剂。

研究区化学风化指数(杨守业等,2007)CIA值为51~69,主要集中在55~65之间。CIA的计算方法为:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100, \quad (1)$$

式中:CaO*指岩石硅酸岩中的CaO,除了要去掉碳

酸盐之外,该值还取决于全岩的 P_2O_5 和 Na_2O 含量。McLennan (1993)提出 $\text{CaO}' = \text{CaO} - 10 \times \text{P}_2\text{O}_5/3$,若计算后的 $\text{CaO}' < \text{Na}_2\text{O}$,则认为需要的 $\text{CaO}^* = \text{CaO}'$;若计算后 $\text{CaO}' > \text{Na}_2\text{O}$,则认为需要的 $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$ 。研究区用此方法校正后计算得到沉积物的CIA值。

ΣREE 组成与化学分化指数(CIA)之间无明显的相关性(图6a),表明研究区化学分化作用对REE含量影响较小。粒度对元素的控制作用被认为是对元素含量的主要控制因素(赵一阳和鄢明才,1994),稀土元素总量的变化也受粒度变化的控制,一般细粒级的泥和粉砂质泥较粗粒级的砂和粉砂含量高。研究区沉积物中稀土元素含量分布研究表明, ΣREE 与细粒沉积物呈低度正相关,而与砂质沉积物呈低度负相关(表2),有向细粒沉积物富集的趋势;而研究区沉积物的 ΣREE 与沉积物粒度平均值之间也呈低度正相关(图6b,相关系数为0.53),反映出粒度对研究区沉积物中REE的控制作用并不显著。

3.2 物质来源分析

渤海东部和黄海北部沉积物主要来自于沿岸河流以及地表径流携带的陆源物质,汇入研究区主要河流为黄河、鸭绿江和朝鲜半岛的汉江、锦江以及可能来自南部的长江物质。

黄河沉积物REE组成主要继承了黄河流域黄土的特征,长江REE特征受该流域下古生代、中生

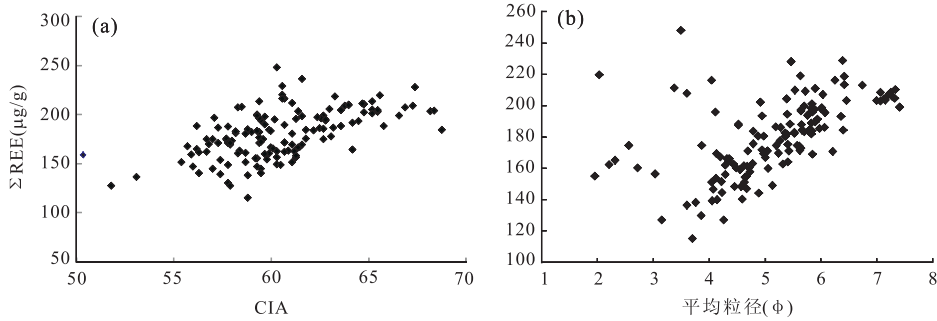


图 6 表层沉积物 CIA 值与 Σ REE 相关关系(a)和 Σ REE 与平均粒径相关关系(b)

Fig. 6 Correlation between Σ REE and CIA in surface sediments (a) and correlation between Σ REE and average grain diameter (b)

代泥岩地层及中、上游地区石灰岩分布的制约(蓝先洪, 1995), 而化学风化对黄河和长江 REE 的组分影响较弱; 长江与黄河沉积物的稀土元素(REE)组成特征不同, 复杂的源岩决定了长江沉积物中的 REE 含量变化比黄河沉积物中的高, 元素含量变化也大于黄河样品(杨守业和李从先, 1999; Yang *et al.*, 2002; 2003). 韩国流入黄海北部的汉江和锦江流域主要由侏罗纪和白垩纪的花岗岩、前寒武纪的片麻岩及第四纪松散冲积物组成, 而碳酸盐的出露很少; 韩国河流沉积物与源岩在 REE 组成上的相似性, 一定程度上反映了流域化学风化并没有显著改变 REE 的分异特征, 韩国河流出现 LREE 明显富集而 HREE 相对亏损的模式(Yang *et al.*, 2003).

由于 REE 在表生地球化学环境下的高稳定性, 研究区周边河流沉积物不同的 REE 分异特征可以用来指示这些河流的入海物质. 黄河、长江沉积物中 REE 分异参数(Yang *et al.*, 2002)与鸭绿江、汉江和锦江沉积物参数(Yang *et al.*, 2003)有明显差别. 鸭绿江、汉江和锦江沉积物 Σ REE 含量较高, 汉江和锦江富集 LREE, 相对亏损 HREE, 而鸭绿江沉积物相对富集 LREE 和 HREE(图 4). 黄河、长江、鸭绿江沉积物 $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 、 $(La/Sm)_{UCC}$ 与汉江和锦江的明显不同, 黄河、长江、鸭绿江其值偏低, 而汉江和锦江偏高. 因此可用 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 值和 $(La/Yb)_{UCC}$ 元素比示踪判别中韩河流入海物质(Yang *et al.*, 2003).

物源判别图解(图 7)表明, 研究区物源主要为鸭绿江、黄河和长江沉积物, 而朝鲜半岛的汉江和锦江沉积物对研究地区物质影响很小, 其判别结果与对南黄海沉积物地球化学研究认为, 韩国沉积物对南黄海的影响范围到 $124^{\circ}E$, 主要影响在 $124^{\circ}30'E$ 以东(蓝先洪等, 2009)得到的结论是一致的. 因此研究区主要是判别鸭绿江、黄河和长江沉积物的贡献,

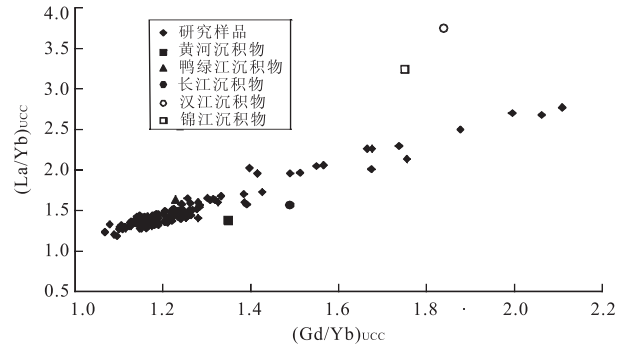


图 7 渤海东部和黄海北部表层沉积物 $(La/Yb)_{UCC}$ 值和 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 值元素物源判别

Fig. 7 Discrimination plots of $(La/Yb)_{UCC}$ vs $(Gd/Yb)_{UCC}$ in surface sediments in the eastern Bohai and northern Yellow Seas

而长江沉积物对黄海沉积物向北影响一般认为到达南黄海的中部泥质区(赵一阳等, 1991; 蓝先洪等, 2009), 所以在这里主要研究鸭绿江、黄河沉积物对研究区物质的影响范围.

选取研究区 Σ REE、 δE_{uN} 、 Σ LREE、 Σ HREE、 Σ LREE/ Σ HREE、 $(La/Lu)_{UCC}$ 以及 $(La/Yb)_{UCC}$ 等稀土元素的特征参数, 在 SPSS 软件中采用离差平方和法对沉积物样品进行 Q 型聚类分析. Q 型聚类是对样品的聚类, 将具有相同特点的样品聚集在一起, 138 个样品分类共生成 4 类汇聚中心, 可将沉积物样品分为 4 个区域(I 区、II 区、III 区和 IV 区, 表 3、图 8).

δE_{uN} 和 $(La/Yb)_N$ 是指示 REE 分异特征的两个重要指标, 与粒级效应并不显著. 因此, 这两个参数可以较好地指示源区信息, 可揭示黄河、鸭绿江沉积物物源存在的差异(窦衍光等, 2012). 图 9 表明, 研究区 II 区、III 区和 IV 区沉积物中 $(La/Yb)_N$ 基本在 8~10 间变化, 与黄河沉积物相近(均值为 9.3). I 区沉积物与鸭绿江沉积物具有相似特征, $(La/Yb)_N$

表 3 Q-型分区稀土元素的特征参数(μg/g)

Table 3 The characteristic parameters of REE (μg/g)

| 分区 | 样品数 | ΣREE | δEu _N | ΣLREE | ΣHREE | ΣLREE/ΣHREE | (La/Lu) _{UCC} | (La/Yb) _{UCC} |
|-------|-----|-------|------------------|-------|-------|-------------|------------------------|------------------------|
| I 区 | 19 | 183.5 | 0.66 | 148.6 | 34.9 | 4.26 | 1.32 | 1.41 |
| II 区 | 65 | 180.9 | 0.66 | 144.7 | 36.2 | 4.00 | 0.99 | 1.07 |
| III 区 | 28 | 154.8 | 0.69 | 118.2 | 36.6 | 3.23 | 0.98 | 1.07 |
| IV 区 | 26 | 200.4 | 0.67 | 164.0 | 36.4 | 4.51 | 1.02 | 1.11 |

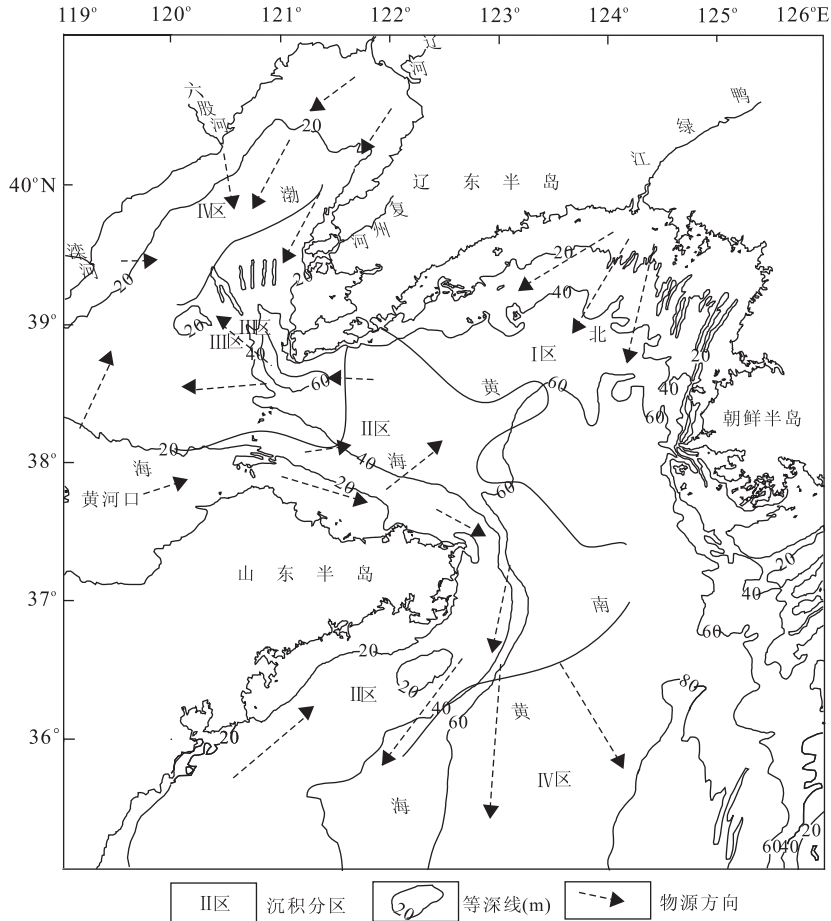


图 8 沉积物分区与物质运移方向

Fig. 8 The subarea and the moving route of the sediment

值较高,其值大部分大于 11,表明轻、重稀土分异明显,其分析结果与东部站位配分模式(图 4)的结论一致。

I 区沉积物包括 19 个站位,位于研究区的东部;该区域沉积物与鸭绿江沉积物具有相似特征,沉积物中 REE 含量、(La/Lu)_{UCC}值和(La/Yb)_{UCC}值较高(表 3)。鸭绿江河口直接与黄海相接,其水、沙可直接入海,从而对黄海区域的沉积作用产生显著影响(高建华等,2003,2008)。北黄海东北部主要反映了鸭绿江河流沉积物物质的输入,主要受到鸭绿江冲淡水组成的辽南沿岸流影响,鸭绿江入海物质主要向西部输送,少部分向西南及向南输送(韦钦胜

等,2011),重矿物组合特征表明辽东半岛东南部海域泥质沉积物是经过较远的距离搬运而来(李艳等,2011),该区域 REE 高含量(表 3)与鸭绿江物质影响有关(刘锡清,2006;Chen *et al.*, 2013)。该区域 CaO、Cr、Ni 含量低,本区沉积物中 CaO、Cr、Ni 含量低与流入该区域河流含量低有关,如鸭绿江河口沉积物中 Ca 平均含量只有 0.77%(李家胜等,2010),Cr 和 Ni 含量也普遍较低(高建华等,2008)。

II 区沉积物包括 65 个站位,分布范围较大,包括山东半岛北部、东部、西南部,处在与沿岸流和黄海水团作用边缘(韦钦胜等,2011),其物质组成受到山东半岛周边沿岸流及山东半岛沿岸侵蚀产物的影

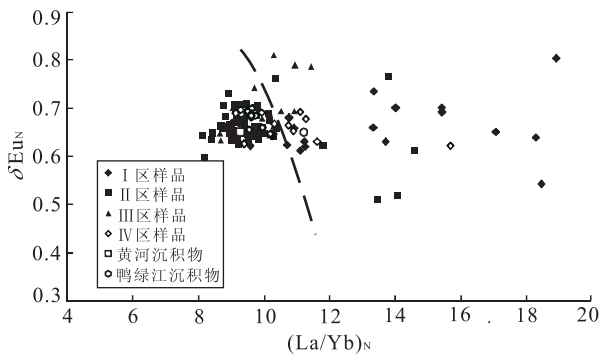


图 9 渤海东部和黄海北部表层沉积物 δE_{uN} 值与 $(La/Yb)_N$ 值物源判别

Fig. 9 Discrimination plots of δE_{uN} vs $(La/Yb)_N$ in surface sediments from the eastern Bohai and northern Yellow Seas

响,物质主要来源于沿岸流携带的黄河沉积物(孔祥淮等,2007).山东半岛以北的北黄海中部海域受沿岸流影响较小,具有相对稳定的水动力环境(赵保仁等,1995),形成了北黄海中部泥质沉积区.山东半岛北侧的沉积物具有向东运输的趋势,同时也有向东北运输的趋势,西部沉积物运输的趋势向东南并转向东,北部沉积物运输的趋势向南,形成了向北黄海中部汇聚的趋势(程鹏和高抒,2000),北黄海中部沉积物中 REE 含量明显增高.该区域 CaO 、 Na_2O 含量高,说明 II 区沉积物主要来自于黄河和古黄河物质,黄河物质具有高 Ca 、 Na 的特点(蓝先洪等,2005).

III 区沉积物包括 28 个站位,位于渤海东部中部区域.渤海东部没有大的河流入海,陆源物质影响小,岸边多为基岩,海蚀作用弱,水中悬浮物含量低;辽东半岛西部沿岸海域水深较浅,水动力较强,河流入海物质很少在此沉积,III 区北部辽东湾区域物质来源于辽河的物质沿渤海东岸在东部环流的作用下向辽东湾南部输送(赵保仁等,1995)及复州河沉积物影响(王利波等,2014);III 区南部区域是进入渤海海水和黄海传来潮波的主要通道,水动力强,受外来水的影响大;III 区正是海流和沿岸流作用强、波浪和潮汐很活跃的地区(韦钦胜等,2011),导致沉积物粗化,因此 REE 含量较低(表 3).早期的研究认为辽东浅滩潮流沙脊为残留沉积(中国科学院海洋研究所海洋地质研究室,1985;刘锡清,1987),后来的研究发现它是全新世潮流的作用的产物,物质来自老铁山水道的侵蚀(刘振夏等,1994;董太禄,1996).

IV 区沉积物包括 26 个站位,位于研究区的西北部、东南部.研究区西北部在环流为主的水动力作用

下(赵保仁等,1995),入海的细颗粒物在渤海湾中南部及其向辽东湾呈条带状延伸形成了渤海泥质沉积,因而大量的元素在细颗粒物质的吸附作用下在此沉积,使得该区域具有较高的元素含量(刘建国等,2007).渤海泥质沉积的形成,主要是黄河物质向西和向北运移进入渤海湾和渤海中部的结果(赵一阳和鄢明才,1994),泥质区北部自早全新世之前便已开始形成,且主要沉积于高海面之前,受滦河物质作用相对较强(刘建国等,2007);同时受到六股河、辽东湾西北入海小溪和海岸侵蚀物质的影响(王利波等,2014).研究区东南部位于山东半岛东南方向的外海域,处于黄海中部海域受沿岸流影响较小,具有相对稳定的水动力环境(赵保仁等,1995),形成了南黄海北部泥质沉积区,这些沉积物中 REE 含量明显增高(表 3、图 2);该区域细粒沉积物主要由现代黄河提供,而长江和朝鲜半岛河流对该区域影响有限(窦衍光等,2012);山东半岛近岸及其东南部沉积物元素组成与现代黄河的相近,具有高 CaO 、 Na_2O 含量,这表明现代黄河物质自山东半岛近岸有向南、向东搬运和扩散的趋势(蓝先洪等,2005),其沉积物元素含量明显受到源岩和粒度制约.

4 结论

渤海东部和黄海北部表层沉积物 138 个样品用 ICP-MS 测试了其稀土元素含量,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)渤海东部和黄海北部海域沉积物稀土元素总量平均含量为 $179.7 \mu g/g$,高于中国陆架海底沉积物稀土元素的平均含量,与中国黄土较为接近,表明研究区沉积物的物质来源主要为周边大陆.

(2)渤海东部和黄海北部海域沉积物中的稀土元素含量具有明显的区域性分布特征,这与鸭绿江、黄河以及周边物质的影响密不可分.研究区东部和辽东半岛东南部局部海域为 ΣREE 高值区,其物质主要来源于鸭绿江;山东半岛北部、东南部、西南部沉积物主要来源于黄河物质输入;研究区西北角沉积物主要来源于黄河及辽宁沿岸物质输入,局部有滦河、六股河物质存在.

(3)Q 型聚类分析并结合元素地球化学统计特征结果,将研究区划分为 4 个地球化学分区: I 区为北黄海东部区域,沉积物与鸭绿江沉积物具有相似特征; II 区为山东半岛近岸周边区域,物质主要来源于沿岸流携带的黄河沉积物; III 区为渤海东部中部

区域,物质来源于辽河的物质和复州河沉积物及来自老铁山水道的侵蚀物质;Ⅳ区位于研究区的西北部由黄河物质向西和向北迁移进入渤海湾和渤海中部形成、局部受到滦河、六股河、辽东湾西北入海小溪和海岸侵蚀物质的影响,东南部为南黄海北部泥质沉积区,物质主要来源于黄河。

References

- Chen, X. H., Li, T. G., Zhang, X. H., et al., 2013. A Holocene Yalu River-Derived Fine-Grained Deposit in the Southeast Coastal Area of the Liaodong Peninsula. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31(3): 636—647. doi:10.1007/s00343-013-2087-1
- Cheng, P., Gao, S., 2000. Net Sediment Transport Patterns over the Northwestern Yellow Sea, Based upon Grain Size Trend Analysis. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 31(6): 604—615 (in Chinese with English abstract).
- Ding, S. M., Liang, T., Wang, L. J., et al., 2005. Advance in Study on Dissolved Rare Earth Elements in Terrestrial Water and Their Distribution Characteristics and Basic Controlling Factors. *Chinese Rare Earths*, 26(4): 53—61 (in Chinese with English abstract).
- Dong, T. L., 1996. Modern Sedimentation Models in the Bohai Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(4): 43—53 (in Chinese with English abstract).
- Dou, Y. G., Li, J., Yang, S. Y., 2012. Element Compositions and Provenance Implication of Surface Sediments in Offshore Areas of the Eastern Shandong Peninsula in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(1): 109—119 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. W., Shi, X. F., Huang, Y. X., et al., 2011. Distributions and Main Controlling Factors of Rare Earth Elements in Core Sediments from the Changjiang Estuary Mud Area over the last 100 Years. *Geochimica*, 40(5): 464—472 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. H., Gao, S., Dong, L. X., et al., 2003. Sediment Distribution and Suspended Sediment Transport in Yalu River Estuary. *Marine Science Bulletin*, 22(5): 26—33 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. H., Li, J., Wang, Z. Y., et al., 2008. Heavy Metal Distribution and their Influence Factors in Sediments of Yalu River Estuary and its Adjacent Sea Area. *Geochimica*, 37(5): 430—438 (in Chinese with English abstract).
- Gu, S. C., Chen, S. M., Wu, B. H., et al., 1989. Ree Geochemistry in Surface Sediments of South China Sea. *Tropic Oceanology*, (2): 93—101 (in Chinese with English abstract).
- Holser, W. T., 1997. Evaluation of the Application of Rare Earth Elements to Paleooceanography. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 132(1—4): 309—323. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 1985. Geology of the Bohai Sea. Science Press, Beijing, 1—230 (in Chinese).
- Jiang, F. Q., Meng, Q. Y., Xu, Z. K., et al., 2008. The REE Imprint on Sediment Provenance of the Northern Okinawa trough since the Last 15ka B. P.. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 39(2): 112—118 (in Chinese with English abstract).
- Kong, X. H., Liu, J., Li, W. R., et al., 2007. Geochemistry of REE and Provenance of Surface Sediments in the Littoral Area of the Northeastern Shandong Peninsula. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(3): 51—59 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., 1995. Sedimentary Chemical Characteristics of Recent Sediments in Huanghe, Changjiang and Zhujiang Rivers Deltas. *Journal of Oceanography In Taiwan Strait*, (1): 44—50 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Wang, H. X., Zhang, Z. X., et al., 2006. Distributions of Rare Earth Elements and Provenance Relations in the Surface Sediments of the South Yellow Sea. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 24(6): 745—749 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Zhang, X. H., Zhang, Z. X., 2005. Material Sources and Transportation of Sediments in the Southern Yellow Sea. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 53—60 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Zhang, X. J., Zhao, G. T., et al., 2009. Distributions of Rare Earth Elements in Sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and Their Provenance Discrimination. *Geochimica*, 38(4): 123—132 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. S., Gao, J. H., Li, J., et al., 2010. Distribution and Controlling Factors of Major Elements in Sediments of the Yalu River Estuary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(1): 25—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Li, A. C., Huang, P., 2011. Distribution of Heavy Mineral Assemblages in Subsurface Sediments of Dalian Bay and their Implications for Provenance and Environment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(6): 13—20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Chen, Z., Yan, W., et al., 2010. Geochemical

- Characteristics of Rare Earth Elements in the Fine-Grained Fraction of Surface Sediment from South China Sea. *Earth Science*, 35(4): 563—571 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Li, A. C., Chen, M. H., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Sediments in the Bohai Sea Mud Area during Holocene. *Geochimica*, 36(6): 559—568 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. Q., 2006. Marine and Coastal Environmental Geology in China Seas. Marine Press, Beijing, 305—330 (in Chinese).
- Liu, X. Q., 1987. Relict Sediment from China Shelf. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 7(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. B., Jiang, Z. X., 1999. Application of Geochemical Analysis of Rare Earth Elements in the Study of Lithofacies Paleogeography. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 23(1): 6—8 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295—303. doi: 10.1086/648222
- Piper, D. Z., 1974. Rare Earth Elements in the Sedimentary Cycle; A Summary. *Chem. Gel.*, 14(4): 285—289.
- Sholkovitz, E. R., Elderfield, H., Szymczak, R., et al., 1999. Island Weathering: River Sources of Rare Earth Elements to the Western Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, 68(1—2): 39—57. doi: 10.1016/s0304—4203(99)00064—x
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust; Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 29—45.
- Wang, J. T., 1990. REE Geochemistry of Surficial Sediments from the Yellow Sea of China. *Geochimica*, 19(1): 44—53 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. B., Li, J., Zhao, J. T., et al., 2014. Detrital Mineral Assemblages and Distributions as Indicators of Provenance and Dispersal Pattern in Surface Sediments from Liaodong Bay, Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, (2): 66—74 (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*, 11(1): 56—65 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. S., Yu, Z. G., Ran, X. B., et al., 2011. Characteristics of the Western Coastal Current of the Yellow Sea and its Impacts on Material Transportation. *Advances in Earth Science*, 26(2): 145—156 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. Q., 1983. REE Geochemistry of Sea-Floor Sediments from the Taiwan Shallow, China. *Geochimica*, 12(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 (in Chinese).
- Xu, Z. K., Lim, D., Choi, J., et al., 2009. Rare Earth Elements in Bottom Sediments of Major Rivers around the Yellow Sea; Implications for Sediment Provenance. *Geo-Marine Letters*, 29(5): 291—300. doi: 10.1007/s00367—009—0142—x
- Xu, F. J., Li, A. C., Xu, Z. K., et al., 2009. Rare Earth Element Geochemistry in Inner Shelf of the East China Sea and Implication for Sediment Provenance. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 27(4): 574—582 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z., Lim, D., Choi, J., et al., 2009. Rare Earth Elements in Bottom Sediments of Major Rivers around the Yellow Sea; Implications for Sediment Provenance. *Geo-Marine Letters*, 29(5): 291—300.
- Xu, Z. K., Li, T. G., Chang, F. M., et al., 2012. Sediment Provenance Discrimination in Northern Okinawa Trough during the Last 24 ka and Paleoenvironmental Implication: Rare Earth Elements Evidence. *Journal of Rare Earths*, 30(11): 1184—1190. doi: 10.1016/S1002—0721(12)60202—6
- 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. doi: 10.1016/s0012—821x(02)00715—x
- Yang, S. Y., Li, C. X., 1999. REE Geochemistry and Tracing Application in the Yangtze River and the Yellow River Sediments. *Geochimica*, 28(4): 374—380 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Wei, G. J., Xia, X. P., et al., 2007. Provenance Study of the Late Cenozoic Sediments in the Changjiang Delta; REE and Nd Isotopic Constraints. *Quaternary Sciences*, 27(3): 339—346 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Youn, J. S., 2007. Geochemical Compositions and Provenance Discrimination of the Central South Yellow Sea Sediments. *Marine Geology*, 243(1—4): 229—241. doi: 10.1016/j.margeo.2007.05.001
- Yang, S. Y., Li, C., Lee, C., et al., 2003. REE Geochemistry of Suspended Sediments from the Rivers around the

- Yellow Sea and Provenance Indicators. *Chinese Science Bulletin*, 48 (11): 1135 - 1139. doi: 10. 1007/BF03185768
- Zhang, X. Y., Zhang, F. Y., Chen, X., et al., 2012. REEs Fractionation and Sedimentary Implication in Surface Sediments from Eastern South China Sea. *Journal of Rare Earths*, 30(6): 614 - 620. doi: 10. 1016/s1002 - 0721(12)60100 - 8
- Zhao, B. R., Zhuang, G. W., Cao, D. M., et al., 1995. Circulation, Tidal Residual Currents and their Effects on the Sedimentations in the Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(5): 466 - 473 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shao, L., Liang, J. S., et al., 2013. Ree Character of Sediment from the Paleo-Red River and its Implication of Provenance. *Earth Science*, (S1): 61 - 69 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. Y., Li, F. Y., Qin, Z. Y., et al., 1991. Source and Genesis of Mud in the Central Part of the South Yellow Sea in Special Reference to Geochemical Data. *Geochimica*, 20(2): 112 - 117 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. Y., Wang, J. T., Qin, C. Y., et al., 1990. Rare-Earth Elements in Continental Shelf Sediments of the China Seas. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(1): 37 - 43 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. G., 2000. Effect of Different Chondrite on the Parameter of Rare Earth Elements. *Reporting of Standardization*, (3): 15 - 16 (in Chinese with English abstract).
- 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., Du, J. M., Zhang, Y. H., et al., 2006. Tracing the Sediment Source at E2 Hole in the South Yellow Sea with Rare Earth Element and Trace Element. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(3): 495 - 500 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- 附中文参考文献**
- 程鹏,高抒,2000.北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势.海洋与湖沼,31(6): 604.
- 丁士明,梁涛,王立军,等,2005.陆地水体中溶解态稀土元素的分布特征及主控因素研究进展.稀土,26(4): 53 - 61.
- 董太禄,1996.渤海现代沉积作用与模式的研究.海洋地质与第四纪地质,16(4): 43 - 53.
- 窦衍光,李军,杨守业,2012.山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义.海洋学报:中文版,34(1): 109 - 119.
- 冯旭文,石学法,黄永祥,等,2011.长江口东南泥质区百年来稀土元素的组成及控制因素.地球化学,40(5): 464 - 472.
- 高建华,高抒,董礼先,等,2003.鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送.海洋通报,22(5): 26 - 33.
- 高建华,李军,王珍岩,等,2008.鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属分布的影响因素分析.地球化学,37(5): 430 - 438.
- 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,(2): 93 - 101.
- 蒋富清,孟庆勇,徐兆凯,等,2008.冲绳海槽北部 15 ka B. P. 以来沉积物源及控制因素——稀土元素的证据.海洋与湖沼,39(2): 112 - 118.
- 孔祥淮,刘健,李巍然,等,2007.山东半岛东北部滨浅海区表层沉积物的稀土元素及其物源判别.海洋地质与第四纪地质,27(3): 51 - 59.
- 蓝先洪,1995.黄河、长江和珠江三角洲近代沉积物的沉积化学特征.台湾海峡,(1): 44 - 50.
- 蓝先洪,张训华,张志珣,2005.南黄海沉积物的物质来源及运移研究.海洋湖沼通报,(4): 53 - 60.
- 蓝先洪,王红霞,张志珣,等,2006.南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系.中国稀土学报,24(6): 745 - 749.
- 蓝先洪,张宪军,赵广涛,等,2009.南黄海 NT1 孔沉积物稀土元素组成与物源判别.地球化学,38(2): 123 - 132.
- 李家胜,高建华,李军,等,2010.鸭绿江河口沉积物元素地球化学及其控制因素.海洋地质与第四纪地质,30(1): 25 - 31.
- 李艳,李安春,黄朋,2011.大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示.海洋地质与第四纪地质,31(6): 13 - 20.
- 刘建国,李安春,陈木宏,等,2007.全新世渤海泥质沉积物地球化学特征.地球化学,36(6): 559 - 568.
- 刘建国,陈忠,颜文,等,2010.南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素地球化学特征.地球科学,35(4): 563 - 571.
- 刘锡清,1987.中国大陆架的残留沉积.海洋地质与第四纪地质,7(1): 1 - 14.
- 刘锡清,2006.中国海洋环境地质学.北京:海洋出版社,305 - 330.
- 刘振夏,夏东兴,汤毓祥,等,1994.渤海东部全新世潮流沉积体系.中国科学 B 辑化学生命科学地学,(12): 1331 - 1338.
- 赵梦,邵磊,梁建设,等,2013.古红河沉积物稀土元素特征及

其物源指示意义. 地球科学(S1): 61—69.

鲁洪波, 姜在兴, 1999. 稀土元素地球化学分析在岩相古地理研究中的应用. 石油大学学报: 自然科学版, 23(1): 6—8.

王金土. 1990. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学. 地球化学, 19(1): 44—53.

王利波, 李军, 赵京涛, 等, 2014. 辽东湾表层沉积物碎屑矿物组合分布及其对物源和沉积物扩散的指示意义. 海洋学报中文版, (2): 66—74.

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, 11(1): 56—65.

韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等, 2011. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响. 地球科学进展, 26(2): 145—156.

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, 12(3): 303—313.

吴明清, 王贤觉. 1991. 东海沉积物的稀土和微量元素. 地球化学, 20(1): 40—46.

徐方建, 李安春, 徐兆凯, 等, 2009. 东海内陆架沉积物稀土元素地球化学特征及物源意义. 中国稀土学报, 27(4): 574—582.

杨守业, 李从先, 1999. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及

示踪作用. 地球化学, 28(4): 374—380.

杨守业, 韦刚健, 夏小平, 等, 2007. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约. 第四纪研究, 27(3): 339—346.

赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等, 1995. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响. 海洋与湖沼, 26(5): 466—473.

赵一阳, 王金土, 秦朝阳, 等, 1990. 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素. 沉积学报, 8(1): 37—43.

赵一阳, 李凤业, 秦朝阳, 等, 1991. 试论南黄海中部泥的物源及成因. 地球化学, 20(2): 112—117.

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.

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. 标准化报道, (3): 15—16.

中国科学院海洋研究所海洋地质研究所室, 1985. 渤海地质. 北京: 科学出版社, 1—230.

朱赖民, 杜俊民, 张远辉, 等, 2006. 南黄海中部 E2 柱样沉积物来源的稀土元素及微量元素示踪. 环境科学学报, 26(3): 495—500.

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.

《地球科学》

2016 年 4 月 第 41 卷 第 4 期 要目预告

| | |
|--|------|
| 柴北缘西段早古生代构造—热事件及其构造环境 | 查显锋等 |
| 腾格里沙漠东缘 26 ka 来环境演化的植硅体记录 | 顾延生等 |
| 多元时间序列分析的滑坡演化阶段划分 | 罗文强等 |
| 贵州福泉牛蹄塘组蠕虫状化石组合的发现 | 庞艳春等 |
| 塔北西部早白垩世卡普沙良群沉积期古隆起演化及其对沉积的控制作用 | 徐桂芬等 |
| 低温气体辅助煤层气压裂中的冷冲击机理 | 张亮等 |
| 使用水力屏障控制单一倾斜储层中 CO ₂ 羽的迁移 | 赵锐锐等 |
| 洞庭盆地 S3-7 孔第四纪年代地层 | 赵举兴等 |