

文章编号:1000-0550(2014)04-0684-08

# 辽东湾东南部海域柱状沉积物稀土元素地球化学特征与物源识别<sup>①</sup>

张现荣<sup>1,2</sup> 李军<sup>1,2</sup> 窦衍光<sup>1,2</sup> 赵京涛<sup>1,2</sup> 胡邦琦<sup>1,2</sup>

(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.国土资源部青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

**摘要** 对辽东湾东南部海域 LDC30 孔沉积物稀土元素(REE)、粒度等指标进行了分析,研究了其沉积物中稀土元素组成特征及其控制因素,并对其物质来源进行了探讨。结果表明,LDC30 孔沉积物  $\Sigma\text{REE}$  平均值为 149.49  $\mu\text{g/g}$ ,略高于黄海和东海,但是低于渤海和南海,并且低于全球沉积物  $\Sigma\text{REE}$  的平均值。研究区沉积物 REE 配分模式表现为明显的轻稀土富集、重稀土相对亏损; $\delta\text{Eu}$  的平均值为 0.71,为中度亏损, $\delta\text{Ce}$  无异常;轻稀土与重稀土之间的分异作用较强,且轻重稀土内部分异明显。根据沉积物 REE 垂向变化特征,可将 LDC30 岩芯以 51cm 为界划分为两段,上段(0~51 cm)  $\Sigma\text{REE}$  含量随着深度的减小而呈增加的趋势,下段(51~99 cm)  $\Sigma\text{REE}$  含量在垂向上没有明显的波动变化,并且上段较下段稀土分异明显。 $\delta\text{Ce}$  整体上比较稳定,但是在上段(0~51 cm)呈现下降的趋势。 $\delta\text{Eu}$  垂向上也相对稳定的趋势。该孔沉积物 REE 参数与粒度之间无明显的相关性,REE 组成不受粒度的控制,但重矿物对 REE 的组成和分布状况有重要的影响。LDC30 孔沉积物物质来源比较稳定,并且具有强烈的陆源特征,其沉积物主要来源于辽东湾北部河流(大辽河、小凌河、双台子河等),同时辽东湾西部河流滦河可能对 LDC30 孔上段沉积物有一定贡献。

**关键词** 辽东湾 稀土元素 物质来源

**第一作者简介** 张现荣 女 1986 年出生 硕士研究生 海洋沉积地球化学 E-mail: xianrong86725@163.com

**通讯作者** 李军 男 研究员 E-mail: qdljun@gmail.com

**中图分类号** P736.4 **文献标识码** A

稀土元素(REE)在环境中具有稳定的化学性质,在由母岩的风化、剥蚀、搬运进入河流并沉积到海底的过程中不易迁移,但由于沉积物的来源以及沉积环境的不同,使得稀土元素的含量配分模式和一些重要稀土元素参数具有一定的差别,但仍然保持着源区的组成特征,并且又能敏感地记录沉积环境和气候的演化信息<sup>[1-4]</sup>,因此,REE 已经被广泛地应用于探讨沉积物来源、物源区性质和气候环境的研究中。近年来,我国对渤海、黄海、东海、南海和台湾海滩等海区以及长江黄河等地区沉积物 REE 地球化学特征、分布及其控制因等方面大量的研究<sup>[5-8]</sup>,并利用 REE 特征进行沉积物物源表层沉积物 REE 的丰度、分布模式和一些 REE 比值参数,有效指示了沉积物的来源、形成条件和控制因素。

辽东湾是中国渤海三大海湾之一,位于渤海北部,是我国纬度最高的半封闭海湾。辽东湾海域潮流主要为不规则半日潮,在西南部海域为规则全日潮和不规则全日潮,潮流以往复流为主,强潮流区见于入

海河口附近<sup>[9]</sup>。湾内环流主要由黄海暖流余脉和辽东湾沿岸流组成,由于受季风的影响,环流具有季节性差异,冬季主要为稳定的顺时针环流,夏季相反,为逆时针,冬季环流强于夏季环流(图2)。水团源于入海径流的冲淡水,盐度较低,分布在 20 m 等深线以内<sup>[10]</sup>。辽东湾周边河流众多,其中主要的河流有滦河、大凌河、小凌河、双台子河、大辽河、六股河等(图1),这些河流源源不断向辽东湾运输大量的泥沙(表1),对辽东湾海域陆源物质的沉积有很大的影响。湾内沉积了丰富的第四纪沉积物,由于波浪和强潮流对沉积物的侵蚀、搬运、再沉积作用,使得湾东部形成辽东浅滩现代沉积区<sup>[9]</sup>。该区域物质来源和水动力环境复杂,前人对其沉积物类型、沉积环境、矿物的组合特征以及辽东浅滩成因等方面已做了大量的研究工作<sup>[11,12]</sup>。研究发现,潮流砂最初来自低海平面时各种环境的物质,经潮流的侵蚀、搬运、再沉积,目前它们已经与潮流动力环境相适应,并且在粒度、矿物、化学和生物等方面均有其自身的特点<sup>[13-15]</sup>。与潮流

<sup>①</sup>辽东湾近海海砂及相关资源潜力调查项目(编号:1212011088110)、国家自然科学基金项目(批准号:40976036)与国家自然科学基金青年基金项目(批准号:40906033,41106058,41206049)联合资助  
收稿日期:2013-02-04;收修改稿日期:2013-11-13

砂相比,前人对本文研究区的研究目前相对比较薄弱,特别是对于该区沉积物稀土元素地球化学研究目前还鲜见报道。本文通过对研究区辽东湾东部潮流沙脊区北侧 LDC30 孔沉积物的稀土元素分析,揭示该区域沉积物的元素地球化学特征和物源属性。

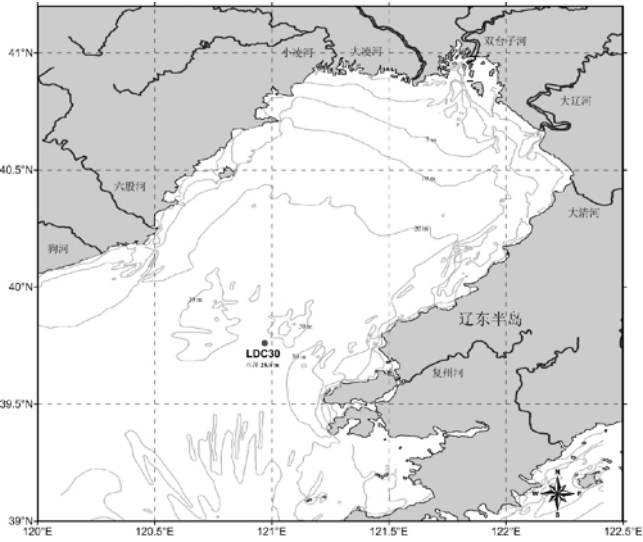


图1 辽东湾 LDC30 孔取样水深及取样位置

Fig.1 Core LDC30 sediment sampling water depth and location

表1 辽东湾入海河流水文特征

Table 1 Hydrological characteristics of rivers around Liaodong Bay

河流	长度 /km	流域面积 /km <sup>2</sup>	水文站	年径流量 /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	年输沙量 /10 <sup>4</sup> t
辽河	1 396	219 000	六间房 唐马寨+邢家窝棚	38.84* 52.89	699.1 303
滦河	877	44 900	滦县	46.51*	1 739*
大凌河	397.4	2 549	锦县	19.63	2 740
小凌河	206.2	5 475	锦州	4.03	364
六股河	153.2	3 080	绥中	6.02	148
复州河	133.7	1 593	关家屯	2.37	16.8

注:数据引自中国海湾志<sup>[18]</sup>。六间房水文站代表双台子河;唐马寨水文站代表太子河,邢家窝棚水文站代表浑河,两者之和代表大辽河;\*数据根据文献数据计算所得。

## 1 材料与方法

本研究样品 LDC30 孔于 2009 年取自于辽东湾北部海域(39.76° N,120.97° E;图 2)。岩芯长度 100 cm,取样水深 28.6 m。取样后将样品带回实验室,之后进行 2 cm 间隔分样进行稀土元素和粒度的分析。

沉积物样品中稀土元素的分析采用等离子质谱分析方法 ICP-MS 进行测定,实验在中科院海洋所海洋环境与地质实验室完成。具体方法如下:准确称取

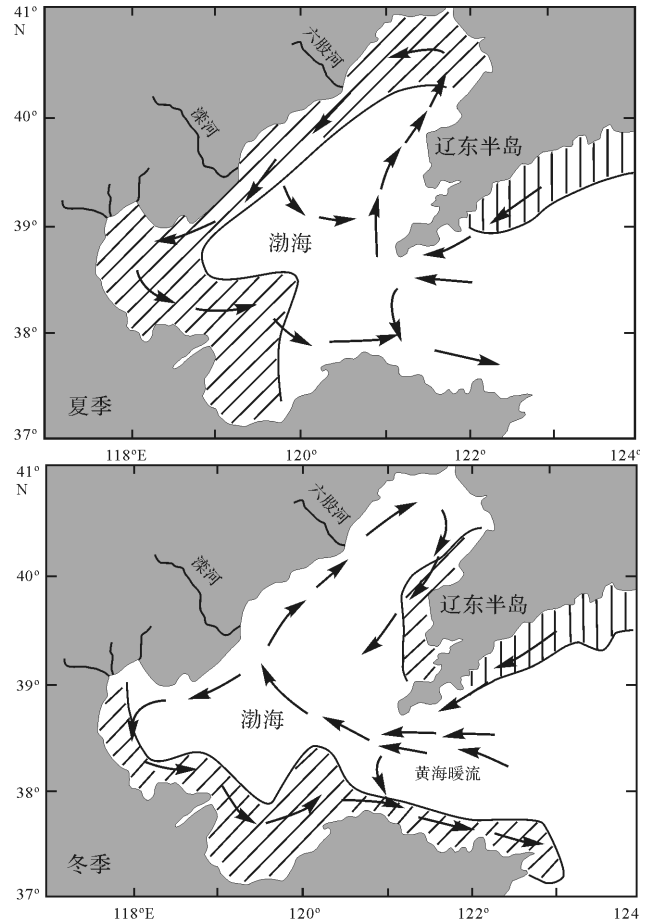


图2 辽东湾周边环流分布图<sup>[16,17]</sup>

Fig.2 The surface currents pattern in the Liaodong Bay and the part of oblique line shadow indicates diluted water

40 mg 样品于 Teflon 溶样罐中,加 0.6 mL HNO<sub>3</sub>+2 mL HF 密封,置于防腐型反应釜内,于 150℃ 烘箱上溶样 24 小时;冷却,加 0.25 mL HClO<sub>4</sub> 于 150℃ 电热板上敞开蒸酸至近干;然后加 1 mL HNO<sub>3</sub>+1 mL H<sub>2</sub>O 密闭于 150℃ 烘箱内回溶 12 h;冷却后,经高纯 H<sub>2</sub>O 定容至 40 g;然后进行上机测试,测试误差小于 5%。

粒度采用 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度分布测量仪进行测,测量过程中要先去除沉积物中有机质,然后再进行充分的分散,之后进行上机测试,测量采用的粒径间隔为 0.15 φ,重复测试误差小于 3%。粒度的测定在国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室完成。

## 2 结果

### 2.1 稀土元素的垂向变化特征

LDC30 孔稀土元素含量及其参数值,如表 2;其垂向变化特征见图 3。总稀土元素(ΣREE)含量波

动不大,变化于 128.04~199.86  $\mu\text{g/g}$  之间,平均值为 149.49  $\mu\text{g/g}$ ,见表 2。低于全球沉积物  $\Sigma\text{REE}$  的平均值(150~300  $\mu\text{g/g}$ )、北美页岩  $\Sigma\text{REE}$  含量(163.94  $\mu\text{g/g}$ );与中国大陆架沉积物的 REE 平均含量相比,LDC30 孔的  $\Sigma\text{REE}$  含量略高于黄海(134.03  $\mu\text{g/g}$ )和东海(140.34  $\mu\text{g/g}$ ),但是低于南海(187.58  $\mu\text{g/g}$ )和渤海(229.29  $\mu\text{g/g}$ )的平均含量。轻稀土元素(LREE: La~Eu)变化于 115.74~182.53  $\mu\text{g/g}$  之间,平均值为 135.49  $\mu\text{g/g}$ ,相对较富集,约占总稀土含量的 90.6%;重稀土元素(HREE: Gd~Lu)丰度较低,变化于 12.3~17.3  $\mu\text{g/g}$  之间,平均值为 14.0  $\mu\text{g/g}$ ,约占总稀土含量的 9.4%。 $\delta\text{Ce}$  变化于 0.96~1.03 之间,平均值为 1,标准偏差为 0.02。 $\delta\text{Eu}$  变化于 0.61~0.80 之间,平均值为 0.71,标准偏差为 0.04。从总稀土元素垂向变化特征看,可在 51cm 处将钻孔分为两段(图 3):上段(0~51 cm)  $\Sigma\text{REE}$  含量随着深度的减小而呈增加的趋势,下段(51~99 cm)  $\Sigma\text{REE}$  含量在垂向上比较稳定,没有明显的波动变化。 $\delta\text{Ce}$  整体上比较稳定,但在上段(0~51 cm)呈现下降,垂向上也相对稳定的趋势,尤其是在岩芯下段  $\delta\text{Eu}$  基本上处

于稳定的状态,但在上段呈现下降的趋势, $\delta\text{Eu}$  在上段也呈现下降的趋势,且下降趋势较  $\delta\text{Ce}$  明显。

## 2.2 REE 配分模式

对 REE 数据进行球粒陨石、北美页岩标准化已被广泛应用于海洋地球化学分析中<sup>[19]</sup>。LDC30 孔稀土元素球粒陨石标准化配分模式,如图 4 所示。总体上表现出明显的轻稀土富集的特征,而重稀土一端较平稳,轻、重稀土具较强的分异作用,呈左高右低的 V 型曲线。无明显的 Ce 异常, Eu 为中度亏损。与世界页岩平均值相比,除个别层位重稀土元素高于世界页岩之外,LDC30 孔岩芯沉积物的 REE 含量整体上低于北美页岩,且各深度沉积物的 REE 分布模式近平行,表明岩芯的物质来源比较稳定。稀土元素的配分模式与上地壳和北美页岩配分模式非常一致,这说明 LDC30 表现出强烈的陆源特征。而 REE 配分曲线中 La~Eu 段较陡, Eu~Lu 段较缓,反映出 LREE 分异程度较 HREE 高。

采用上地壳的平均值对稀土元素进行标准化,发现 LDC30 孔沉积物稀土元素配分模式近似的呈直线并出现略微右倾的趋势,未见明显的 Eu 和 Ce 异常,

表 2 LDC30 孔沉积物稀土元素的含量( $\mu\text{g/g}$ )、特征参数及平均值

Table 2 Contents ( $\mu\text{g/g}$ ) and some characteristic parameters of REE in Core LDC30

	$\Sigma\text{REE}$	LREE	HREE	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	$\delta\text{Ce}_N$	$\delta\text{Eu}_N$
均值	149.49	135.49	14.00	11.01	3.9	1.93	1	0.71
最大值	199.86	182.53	17.33	12.51	4.27	2.10	1.03	0.80
最小值	128.04	115.74	12.30	9.73	3.69	1.74	0.96	0.61
标准偏差	13.25	12.36	0.95	0.64	0.13	0.08	0.02	0.04

注: \* N 为球粒陨石标准化。

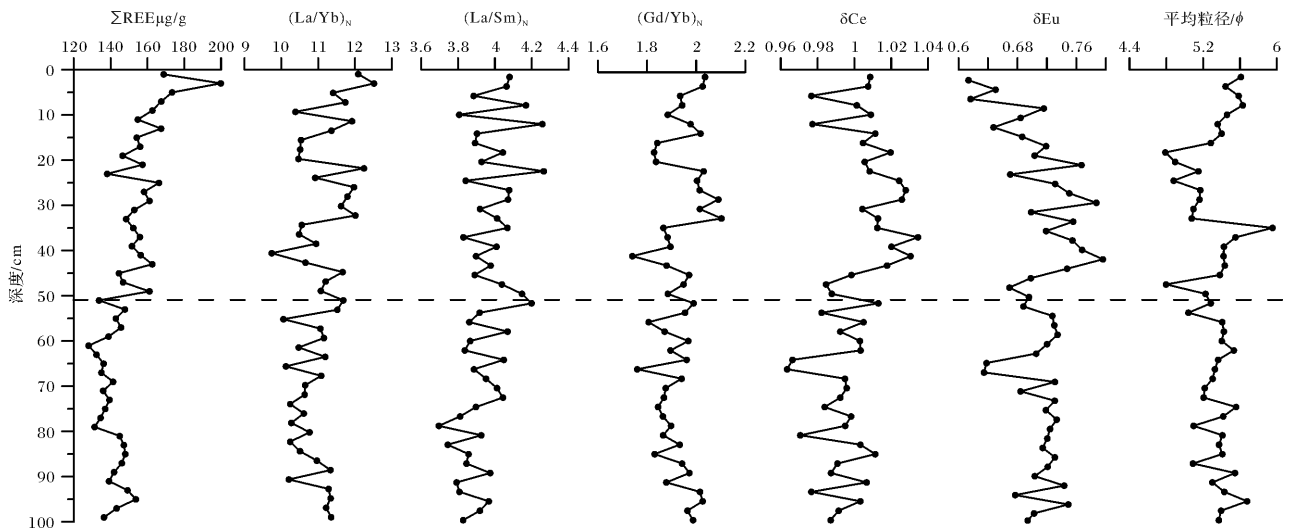


图 3 LDC30 孔稀土元素及其参数垂向变化特征

Fig.3 Vertical profiles of REE and some characteristic parameters of REE in Core LDC30

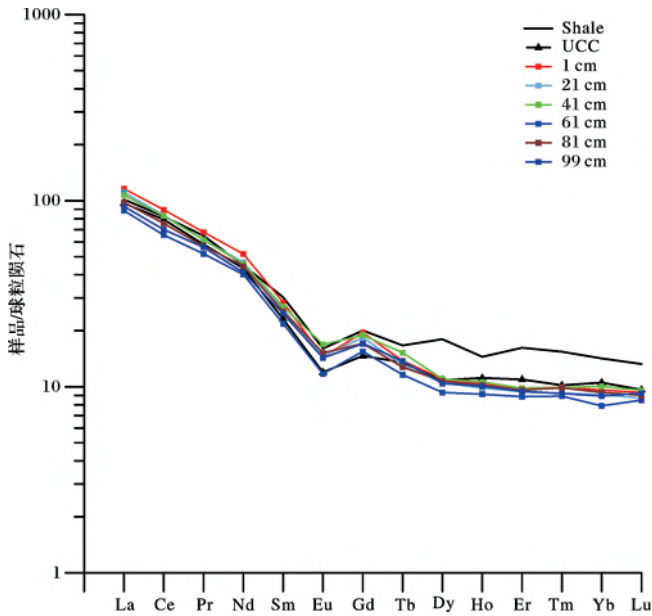


图4 LDC30孔稀土元素球粒陨石标准化配分模式  
Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of samples in Core LDC30

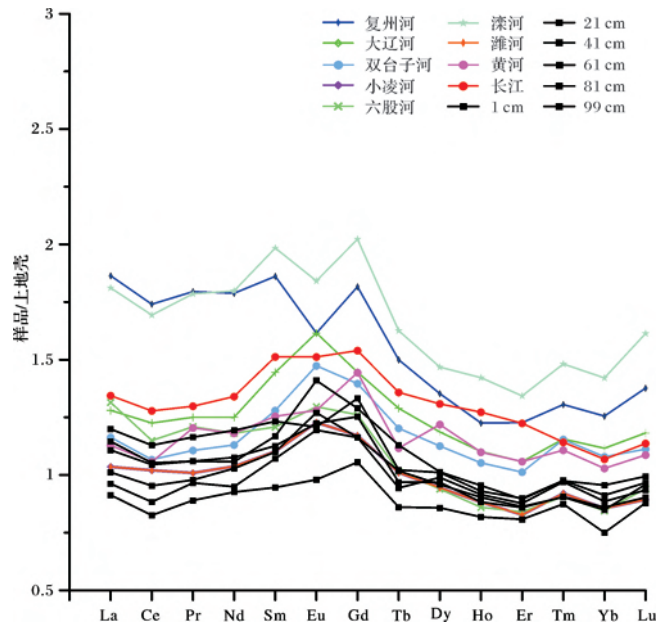


图5 LDC30孔稀土元素上地壳标准化配分模式  
Fig.5 UCC-normalized REE distribution patterns of samples in Core LDC30

不同深度配分模式具有明显的一致性(图5),基本处于平行的状态,并且均表现为重稀土元素(HREE)相对亏损的模式。与辽东湾周边河流标准化曲线相比,稀土元素的配分模式与大辽河、双台子河、小凌河非常接近,而与复州河具有一定的差异。与长江、黄河标准化曲线比,与黄河较为接近。

### 2.3 稀土元素的分馏特征

通常用REE的典型参数来反映轻、重稀土元素之间的分馏特征,轻、重稀土元素内部的分馏特征。 $(La/Yb)_N$ 一般被用于指示轻、重稀土元素之间的分馏特征,比值越大,说明LREE越富集。 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 用于指示LREE和HREE的内部分异特征,比值越大,说明轻LREE和HREE内部分异特征越明显<sup>[20]</sup>。稀土元素的分馏特征的典型参数值如表2所示; $(La/Yb)_N$ 变化范围为9.73~12.51,平均值为11.01,表明沉积物中LREE和HREE分异较明显; $(La/Sm)_N$ 值介于3.69~4.27之间,平均值3.9, $(Gd/Yb)_N$ 均值为1.93。各参数的垂向变化特征如图3,下段 $(La/Yb)_N$ 变化趋势比较稳定,上段则上呈现略微上升的趋势,与 $\Sigma REE$ 变化趋势相似。 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 整体上比较稳定,没有明显的增加或减少。

沉积物中REE组成由于受到粒度和矿物的影响而产生的差异,但总体来说,REE具有相似的化学性质和低溶解度,在风化和成岩作用过程中很少发生分

馏<sup>[21]</sup>。 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值是表征REE分馏的两个参数,研究区岩芯上段 $(Gd/Yb)_N$ 与平均粒径( $M_z$ )相关系数 $R^2$ 为0.017,下段的相关系数 $R^2$ 为0.019,总体整个岩芯平均粒径( $M_z$ )与 $(Gd/Yb)_N$ 相关系数几乎为零(图6),并且 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 之间也几乎不相关,表明该岩芯沉积物中稀土元素的分馏不受粒度的控制。

## 3 讨论

### 3.1 稀土元素的控制因素

研究发现,控制沉积物中REE组成最主要的因素是物源<sup>[22~25]</sup>,而对于有相同且稳定来源的沉积物,在经过搬运沉积过程中受到化学风化、水动力分选等作用造成粒度与矿物的不同而产生REE组成与分布模式的差异<sup>[26]</sup>。因此,在用REE进行沉积物物源示踪时,应对影响沉积物REE组成的制约因素进行探讨。

粒度是控制沉积物REE组成的重要因素。REE趋向于在细粒沉积物中富集,研究区LDC30孔沉积物粒径介于 $4.79\sim 5.95\phi$ 之间,粒度较粗,并且粒度在0~51cm和51~99cm有一定的差别,REE在这两段内也存在一定的差别,但是 $\Sigma REE$ 与粒度之间并没有明显的相关性(图3),经计算它们之间的相关系数 $R^2$ 为0.016,这表明REE与粒度之间无明显的相关

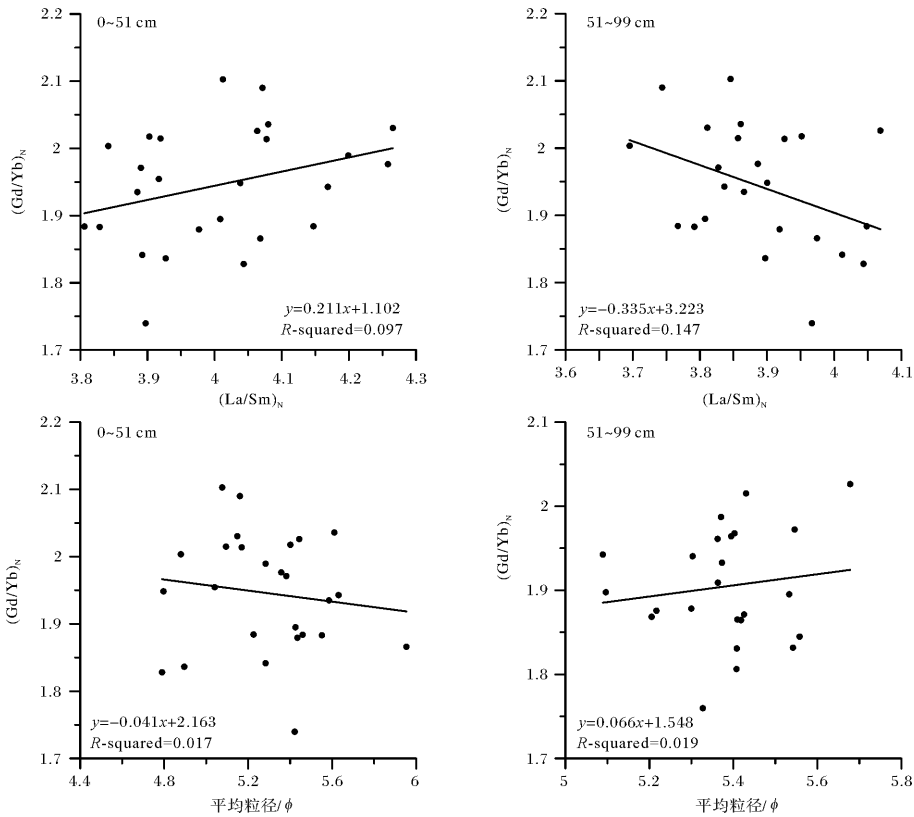


图6 不同层位稀土元素特征参数与粒度的相关性

Fig.6 Correlations between some characteristic parameters of REE and gran size in Core LDC30

性。 $\Sigma$ REE 含量与主要赋存于黏土粒级的细颗粒中受控于“粒度效应”的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等亦呈弱负相关关系(相关系数分别为-0.15, -0.18),说明岩芯 REE 的组成基本不受“粒度效应”的控制。

研究发现,沉积物中的重矿物对整个沉积物的 REE 含量及组成有显著影响:HREE 趋向富集于锆石、石榴子石、电气石等中,LREE 和 MREE 则在榍石、褐帘石、角闪石、磷灰石、独居石等中含量较高<sup>[17]</sup>。辽东湾重矿物含量与黄海、东海等海域相比较,且沉积物在潮流的往复淘洗作用下使得沉积物中角闪石、石榴子石、黝帘石等重矿物相对含量较高;此外,辽东湾周边河流(滦河、六股河、小凌河、大凌河、双台子河等)入海沉积物中普通角闪石、绿帘石、磁铁矿、钛铁矿、石榴子石、褐铁矿重矿物含量较高<sup>[27]</sup>。LDC30 孔沉积物中 LREE 含量远高于 HREE (特别是上段 0~51 cm;图 3),轻重稀土分异明显的特征可能与周边河流重矿物的含量有关。

### 3.2 物质来源探讨

辽东湾是一个半封闭的海湾,沉积物主要来源于周边入海河流、外来海水带入、沿岸岛屿及基岩的侵

蚀等,其中以河流输入物质的贡献最为突出<sup>[5]</sup>。另外,河流输入物质的迁移也受到海洋水动力条件(潮流和环流)的制约。辽东湾海域潮流主要为不规则半日潮,在西南部海域为规则全日潮和不规则全日潮,潮流以往复流为主,强潮流区见于入海河口附近<sup>[5,9]</sup>。然而,在像渤海这样的浅海系统中,沉积物的长期输运过程主要是环流的作用<sup>[28]</sup>。辽东湾内环流主要有黄海暖流余脉和辽东湾沿岸流组成,近岸地区主要受沿岸流的控制,由于受季风的影响,环流具有季节性差异(图 2),并且冬季环流强于夏季,因此辽东湾内沉积物在长期的搬运过程中主要受冬季环流的影响。

辽东湾区沿岸有众多河流输入,沿岸河流切割河床、冲刷两岸母岩,携带大量泥沙源源不断地注入辽东湾。早期的研究发现湾内大部分地区沉积物皆是现代陆源碎屑沉积<sup>[29]</sup>。近些年的研究证实,辽东湾东部区域由于较强的潮汐作用而发育形态典型的潮流沙脊,这片区域沉积物是全新世涨潮流三角洲演化的产物,其物质主要来自老铁山水道<sup>[30]</sup>。本文研究的 LDC30 孔位于砂脊北部区域,但沉积物粒度特征

与潮流沉积物不一致,具有河流砂的特征。因此,LDC30位可能为高水位体系域下的河口沉积<sup>[30]</sup>。

研究区 LDC30 孔沉积物球粒陨石标准化配分模式(图 4)与上地壳以及世界页岩相似,表明研究区物质主要来自于陆源的输入,这与前人研究结果相同<sup>[10]</sup>。由于各河流域的母岩性质不同,造成不同河流及河口沉积物中稀土元素参数存在一定的差异。为进一步研究辽东湾周边河流输入物质对 LDC30 孔沉积物的影响,本文采用稀土元素参数 $(La/Yb)_{ucc}$ 与 $\delta Eu$ 进行物源的判别。下段(51~99 cm)稀土元素的参数分布比较集中(图 7),并且与大辽河、双台子河、小凌河较为相似,而与六股河、复州河差异明显。大辽河、双台子河、小凌河这三条河流入海沉积物矿物学等特征等相似<sup>[27]</sup>,由于稀土元素受重矿物的制约作用,因而其沉积物中稀土元素的 $(La/Yb)_{ucc}$ 与 $\delta Eu$ 图解也较为接近(图 7)。上段(0~51 cm)物源判别图中显示沉积物稀土元素参数分布相对分散,与河流沉积物参数对比发现,LDC30 孔上段物源与下段基本相同,同样也主要来自于大辽河、双台子河、小凌河,与六股河、复州河存在明显差异,除此之外,滦河可能存在一定的贡献。大辽河、双台子河、小凌河都是位于辽东湾湾顶的河流(图 1),这些河流虽然与 LDC30 距离相对较远,但是其年径流量与输沙量都比较大(表 1),并且加上辽东湾内主要的环流(冬季环流)的作用(图 2),使得河流的输入物质被搬运到研究区内;而六股河、复州河的年径流量与输沙量非常小,尤其是复州河,其年输沙量为 $16.8 \times 10^4$  t,因此,这两条河流的沉积物很难被输送到研究区。因此,六股河、复州河物质的输入对岩芯 LDC30 沉积物的沉积基本上没有影响。滦河虽然年输沙量较大(表 1),但是由于辽东湾内主要的海洋水动力作用,冬季为顺时针环流,滦河入海物质在沿岸流的作用下向北运移;夏季,入海物质在沿岸流的作用下向南运移,因此滦河入海沉积物对研究区沉积物影响较小,但是可能在洪水或风暴潮的情况下,滦河可能成为 LDC30 沉积物的物质来源之一。因此,LDC30 孔沉积物主要来源于辽东湾北部河流(大辽河、小凌河、双台子河等),同时辽东湾西部河流滦河可能对 LDC30 孔上段沉积物有一定贡献。

## 4 结论

(1) 辽东湾南部 LDC30 孔沉积物 $\Sigma REE$ 平均值为 $149.49 \mu g/g$ ,低于全球沉积物 $\Sigma REE$ 的平均值。

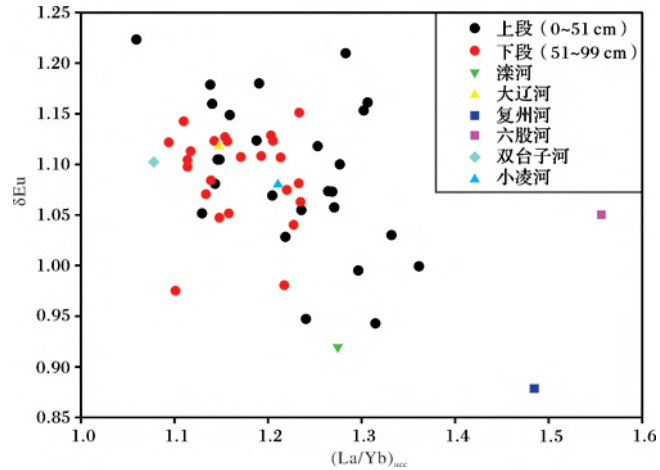


图 7 LDC30 孔沉积物 $(La/Yb)_{ucc}$ 与 $\delta Eu$ 物源判别图

Fig.7 Discrimination plot of  $(La/Yb)_{ucc}$  and  $\delta Eu$  for sediments of Core LDC30

沉积物 $(La/Yb)_N$ 平均值为 11.01,呈现轻稀土明显富集,重稀土相对亏损的特征;并且轻重稀土内部分异明显。 $Eu$ 中度亏损, $\delta Eu$ 均值为 0.71, $Ce$ 无异常。整个岩芯稀土元素含量变化趋势比较明显,从底层到岩芯顶部 $REE$ 呈现先稳定后增加的趋势,可以 51 cm 为界将岩芯划分为两段。

(2) LDC30 孔沉积物粒径介于 $4.79 \sim 5.95 \phi$ 之间,粒度较粗。 $REE$ 组成参数与粒度之间无明显的相关性,而辽东湾重矿物组成与 $REE$ 组成特征存在相关性,表明岩芯 $REE$ 组成以及分异特征不受粒度的控制,但是受到重矿物的影响。

(3) 对辽东湾南部 LDC30 孔沉积物物源分析发现,该孔沉积物具有强烈的陆源特征,并且其物质来源比较稳定,其沉积物主要来源于辽东湾北部河流(大辽河、小凌河、双台子河等),同时辽东湾西部河流滦河可能对 LDC30 孔上段沉积物有一定贡献。

## 参考文献 (References)

- 1 Elderfield H, Upstill Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, coastal seas and their significance to the composition of the ocean waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4): 971-991
- 2 Sholkovitz E R, Landing W M, Lewis B L. Ocean particle chemistry: The fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(6): 1567-1579
- 3 刘英俊,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1984:194-215 [Liu Yingjun, et al. *Element Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 194-215]

- 4 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,1989:137-153 [Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, *et al.* Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989: 137-153]
- 5 赵一阳,王金土,秦朝阳,等. 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素[J]. 沉积学报,1990,8(1):37-43 [Zhao Yiyang, Wang Jintu, Qin Chaoyang, *et al.* Rare earth element in continental shelf sediments of the China Seas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(1): 37-43]
- 6 蓝先洪,申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的稀土元素地球化学特征[J]. 海洋通报,2002,21(5):46-53 [Lan Xianhong, Shen Shunxi. Geochemical characteristics of rare earth elements of sediment cores from the central South Yellow Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(5): 46-53]
- 7 王贤觉,陈毓蔚,雷剑泉,等. 东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学,1982,11(1):56-65 [Wang Xianjue, Chen Yuwei, Lei Jianquan, *et al.* REE geochemistry in sea-floor sediments in the continental shelf of East China Sea[J]. Geochimica, 1982, 11(1): 56-65]
- 8 吴明清. 我国台湾浅滩海底沉积物稀土元素地球化学[J]. 地球化学,1983,30(3):304-313 [Wu Mingqing. REE geochemistry of sea-floor sediment from the Taiwan shallow, China[J]. Geochimica, 1983, 30(3): 304-313]
- 9 苗丰民,李淑媛. 辽东湾北部潮滩及浅海区泥沙运移趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质,1992,12(3):21-35 [Miao Fengmin, Li Shuyuan. Suspension transportation tendency in tidal flat and shallow marine region in the northern Liaodong Bay[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1992, 12(3): 21-35]
- 10 秦蕴珊,赵一阳,赵松龄,等. 渤海地质[M]. 北京:科学出版社,1985 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling, *et al.* Geology of the Bohai Sea[M], Beijing: Science Press, 1985]
- 11 孙洪光. 辽东湾北部晚更新世中期以来的沉积特征及环境演化[D]. 青岛:中国海洋大学,2005 [Sun Hongguang. Sedimentary characteristic and environmental evolution in the north of Liaodong Bay since medium-term of Late Pleistocene[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005]
- 12 宋云香,张永华,郑延英,等. 辽东湾岸带沉积物中的矿物特征与物质来源[J]. 海洋通报,1987,6(4):28-37 [Song Yunxiang, Zhang Yonghua, Zheng Yanying, *et al.* The mineral characteristic and substance sources of coastal sediment in the Liaodong Bay[J]. Marine Science Bulletin, 1987, 6(4): 28-37]
- 13 刘振夏. 江苏潮流砂的粒度特征及其沉积环境的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,1983,3(4):25-33 [Liu Zhenxia. A study on the characteristics of grain size and depositional environment of the tidal current sand of Jiagsu[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1983, 3(4): 25-33]
- 14 刘振夏,夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京:海洋出版社,2004:109-114 [Liu Zhenxia, Xia Dongxing. Tidal Sand in the China Seas[M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 109-114]
- 15 符文侠. 第四纪以来辽东湾滨岸沉积特征与沉积环境的演变[J]. 沉积学报,1989,7(1):127-134 [Fu Wenxia. The sedimentary characteristic and environmental evolution in the coastal area of the Liaodong Bay in Quaternary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(1): 127-134]
- 16 Fang Y, Fang G, Zhang Q. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000,18(1): 1-9
- 17 Guan B, Zhou D, Liang Y, *et al.* Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[J]. Oceanology of China Seas, 1994,1(2): 17-26
- 18 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志:第十四分册(重要河口)[M]. 北京:海洋出版社,1998 [Compiling Council of Chinese Embayment. Chinese Embayment: Part 14 (Important Estuary) [M]. Beijing: Ocean Press, 1998]
- 19 杨守业,李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展,1999,14(2):164-167 [Yang Shouye, Li Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source [J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(2): 164-167]
- 20 徐方建,李安春,徐兆凯,等. 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,2009,27(4):574-582 [Xu Fangjian, Li Anchun, Xu Zhaokai, *et al.* 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, 2009, 27(4): 574-582]
- 21 窦衍光,李军,李炎. 北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组成及物源指示意义[J]. 地球化学,2012,42(2):147-157 [Dou Yanguang, Li Jun, Li Yan. Rare earth element compositions and provenance implication of surface sediments in the eastern Beibu Gulf [J]. Geochimica, 2012, 42(2): 147-157]
- 22 Dou Yanguang, Yang Shouye, Liu Zhenxia, *et al.* Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions [J]. Marine Geology, 2010, 275(1): 212-220
- 23 Condie K C. Another look at rare earth elements in shale [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991,55(9): 2527-2531
- 24 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-190
- 25 Yang S Y, Jung H S, Choi M S. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002,201(2): 407-419
- 26 冯旭文,石学法,黄永祥,等. 长江口东南泥质区百年来稀土元素的组成及控制因素[J]. 地球化学,2011,40(5):464-472 [Feng Xuwen, Shi Xuefa, Huang Yongxiang, *et al.* Distributions and main controlling factors of rare earth elements in core sediments from the Changjiang Estuary mud area over the last 100 years [J]. Geochimica, 2011, 40(5): 464-472]
- 27 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京:海洋出版社,2008:39-49 [Chen Lirong. Sedimentary Mineralogy of the China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 39-49]
- 28 Jiang W, Pohlmann T, Sun J, *et al.* SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and san numerical modelling[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(34):175-188

- 29 中科院海洋所. 渤海地质[M]. 北京:科学出版社, 1985 [Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985]
- 30 刘振夏, 夏东兴, 汤毓祥, 等. 渤海东部全新世潮流沉积体系[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(12):1331-1338 [Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Tang Yuxiang, *et al.* Holocene tidal current rages in the Eastern Bohai [J]. Science in China (Seri. B), 1994, 24(12): 1331-1338]
- 31 窦衍光, 刘京鹏, 李军, 等. 辽东湾东部砂质区沉积物粒度特征及其物源指示意义[J], 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5):27-34 [Dou Yanguang, Liu Jingpeng, Li Jun, *et al.* Grain size characteristics of the core sediments in the eastern Liaodong Bay and implications for depositional environment[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(5): 27-34]

## REE Geochemical Characteristics and Provenance Discrimination of Core LDC30 in the Southeastern Part of Liaodong Bay

ZHANG Xian-rong<sup>1,2</sup> LI Jun<sup>1,2</sup> DOU Yan-guang<sup>1,2</sup> ZHAO Jing-tao<sup>1,2</sup> HU Bang-qi<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

**Abstract:** In this study, rare earth elements (REEs) and grain size of Core LDC30 sediments taken from the southeastern Liaodong Bay have been analyzed to investigate the sediment elemental compositions, controlling factors and the provenance. The total content of rare earth elements of Core LDC30 is in average of 149.49  $\mu\text{g/g}$ , slightly higher than the Yellow Sea and the East China Sea, but lower than the Bohai Sea, the South China Sea, and the average value of the global sediments. The REE patterns show significant enrichment in light REEs, with HREE relatively loss. The mean value of Eu is 0.71 which is in the scope of intermediate negative Eu abnormal,  $\delta\text{Ce}$  is without anomalies. And the fractionation between light and heavy REEs is obvious. REEs concentrations of core sediments vary greatly in vertical profiles, LDC30 is divided into two sections by 51 cm. In the upper part (0~51 cm), REEs concentrations fluctuate more obvious than the underpart (51~99 cm), and the upper part REEs contents show an increasing trend with depth decreasing, while the underpart doesn't present a significant fluctuation in vertical. Besides that, the REE fractionation in the upperpart is more obvious than the underpart.  $\delta\text{Ce}$  as a whole is relatively stable, but in the upper section shows a downward trend.  $\delta\text{Eu}$  is being stable in vertical. The correlation between REE parameter and grain sizes is not obvious. But heavy minerals exert an important influence on REEs composition and distribution. The source of LDC30 sediments is relatively stable and shows strong terrigenous characteristics. Discrimination plots based on REE fractionation parameters suggest that the cored sediments originated mostly from the northern part rivers (Liaohe River, Xiaoling River, Shuangtaizi River) of the Liaodong Bay, and Luan river in the western part of Liaodong Bay has a certain contribution to the upper part of Core LDC30.

**Key words:** Liaodong Bay; rare earth element; provenance