



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

## 印度洋东经90° 海岭现代沉积物稀土元素组成及其物源示踪意义

齐文菁, 李小艳, 范德江, 张辉, 殷征欣, 刘升发

**Rare earth element composition of the surface sediments from the Ninetyeast Ridge and its implications for provenance**

QI Wenjing, LI Xiaoyan, FAN Dejiang, ZHANG Hui, YIN Zhengxin, and LIU Shengfa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021050701>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126

##### 南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhua area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

##### 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

##### 新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

##### 南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

##### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号，获得更多资讯信息

齐文菁,李小艳,范德江,等.印度洋东经90°海岭现代沉积物稀土元素组成及其物源示踪意义[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(2): 92-100.  
QI Wenjing, LI Xiaoyan, FAN Dejiang, et al. Rare earth element composition of the surface sediments from the Ninetyeast Ridge and its implications for provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 92-100.

# 印度洋东经90°海岭现代沉积物稀土元素组成及其物源示踪意义

齐文菁<sup>1,2</sup>,李小艳<sup>2,3</sup>,范德江<sup>1,3</sup>,张辉<sup>2</sup>,殷征欣<sup>4</sup>,刘升发<sup>2,3</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100

2. 自然资源部第一海洋研究所,自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室,青岛 266061

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室,青岛 266237

4. 国家海洋局南海调查技术中心,广州 510275

**摘要:**基于印度洋东经90°海岭42个表层沉积物的粒度和稀土元素(REE)组成及其空间分布特征,判别了研究区现代沉积物的主要来源,并结合水动力格局等要素探讨了东经90°海岭北部区域沉积物输运方式。结果显示,研究区42个表层沉积物总稀土含量( $\Sigma$ REE)为26.37~156.8 μg/g,平均值为57.35 μg/g,特点是轻稀土含量( $\Sigma$ LREE)高,重稀土含量( $\Sigma$ HREE)低且均一、存在明显的Ce和Eu异常。REE组成和空间分布受沉积物来源控制显著,球粒陨石标准化后的Sm/Nd-δEu物源判别图以及判别函数( $F_D$ )结果显示,研究区北部表层沉积物的最主要来源是伊洛瓦底江陆源物质,次要来源是戈达瓦里-克里希纳河输入的印度半岛物质,而南部区域则受苏门答腊岛陆源物质影响显著。不同源区沉积物在研究区的输运过程主要受控于热带季风系统驱动下的季节性表层环流以及浊流和风。

**关键词:**沉积物;稀土元素;物源;东经90°海岭;印度洋

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021050701

## Rare earth element composition of the surface sediments from the Ninetyeast Ridge and its implications for provenance

QI Wenjing<sup>1,2</sup>, LI Xiaoyan<sup>2,3</sup>, FAN Dejiang<sup>1,3</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, YIN Zhengxin<sup>4</sup>, LIU Shengfa<sup>2,3</sup>

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

4. South China Sea Marine Engineering Surveying Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** Spatial distribution patterns of grain size and rare earth elements (REE) are studied in this paper for the 42 surface sediment samples collected from the Ninetyeast Ridge of the Indian Ocean. The main sources of sediments are identified and the sediment transport modes are discussed on the hydrodynamic environment features. The results suggest that the total concentrations of rare earth elements in the 42 surface sediments of the study area vary between 26.37 μg/g and 156.8 μg/g, with an average at 57.35 μg/g. The samples are rich in light REE and uniform in heavy REE with obvious negative anomalies of Eu and Ce. The composition and spatial distribution of REE are significantly controlled by the source of sediments. According to the chondrite-normalized Sm/Nd-δEu diagram for provenance identification and the discriminant function ( $F_D$ ), the sediments in the northern study area are mainly coming from the Irrawaddy River, and the subordinate is sourced from the Indian Peninsula by the Godavari River-Krishna River. The sediments in the southern study area are significantly affected by the Sumatra. The transportation process of sediments from different sources in the study area is mainly controlled by seasonal surface circulation driven by the tropical monsoon system, turbidity currents and wind.

**Key words:** sediment; rare earth elements; provenance; Ninetyeast ridge; Indian Ocean

---

资助项目:全球变化与海气相互作用专项“东印度洋IND-CJ04区块海底底质和底栖生物调查”(GASI-02-IND-CJ04)

作者简介:齐文菁(1997—),女,硕士研究生,主要从事海洋沉积学研究, E-mail: qiwenjing795@163.com

通讯作者:刘升发(1979—),男,研究员,研究方向为海洋沉积学, E-mail: liushengfa@fio.org.cn

收稿日期:2021-05-07; 改回日期:2021-06-18。 文凤英编辑

稀土元素(REE)具有相似的地球化学性质和低溶解度, 通常情况下物理化学性质稳定, 在风化、搬运和沉积过程中基本不会被破坏, 其组成主要受源岩类型控制<sup>[1-3]</sup>。因此 REE 被广泛应用在物源示踪方面, 并已取得了良好效果<sup>[4-5]</sup>, 其空间分布规律可指示不同来源物质的沉积过程<sup>[6]</sup>, 而其时间变化序列则可反演过去地质时期沉积环境演化历史<sup>[7]</sup>。

东经 90° 海岭大致沿东经 90° 线延伸, 将孟加拉湾分隔为西部盆地和中央盆地, 海岭北至孟加拉大陆架的西缘, 南至中印度洋海盆的阿法纳西-尼基廷海山, 其大部分被孟加拉沉积扇覆盖<sup>[8-9]</sup>。前人对东经 90° 海岭海岭的起源、性质和沉积记录有一定研究<sup>[10-15]</sup>, 海岭区域沉积速率相对稳定, 沉积记录连续, 沉积物主要为生物成因的远洋  $\text{CaCO}_3$ <sup>[12]</sup>, 碳酸盐组分高<sup>[15]</sup>。

研究区北部水动力条件以孟加拉湾表层环流为主, 孟加拉湾冬季盛行东北风, 表层环流呈逆时针方向, 夏季盛行西南风, 表层环流呈顺时针方向<sup>[16]</sup>。

西南季风盛行时, 顺时针方向的孟加拉湾环流通过普雷帕里斯海峡进入安达曼海, 东北季风盛行时, 表层环流继续向南流动, 与印度尼西亚沿岸的表层洋流汇合, 通过十度海峡和格雷特海峡流动至海岭<sup>[17]</sup>。此外, 前人一般认为海岭北部还存在一定的浊流作用<sup>[18]</sup>; 在印度洋赤道以南有一支较强的赤道逆流, 流速较大<sup>[19]</sup>, 研究区南部在赤道逆流影响范围内。印度洋赤道以南 9 月后受东南信风控制, 赤道以北冬末春初受东北季风的控制<sup>[20]</sup>。

为此, 本文以东经 90° 海岭北部 42 个表层沉积物为研究对象(图 1), 开展现代沉积物 REE 组成特征研究, 揭示其空间分布规律, 探讨影响其组成的主要因素及其蕴含的沉积物“源-汇”过程信息, 为理解热带印度洋陆海相互作用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

本文使用样品为国家海洋局南海调查技术中

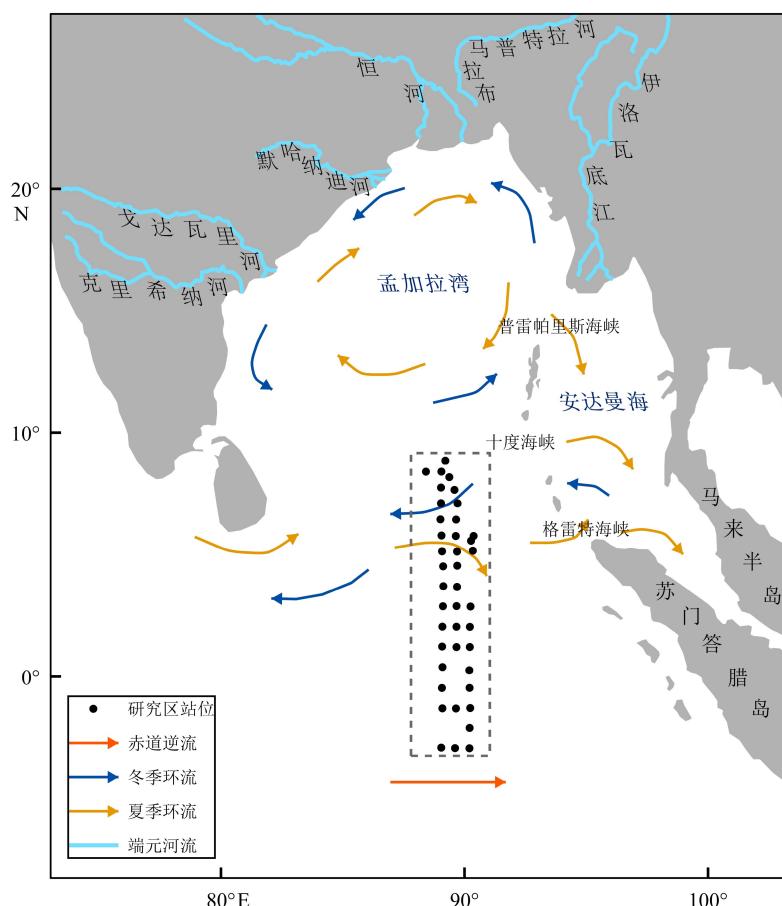


图 1 研究区地理位置  
表层环流和赤道逆流据文献 [19, 21] 改绘。

Fig.1 Location of the study area

Circulation patterns and Equatorial countercurrent are modified from [19, 21].

心 2019 年在东经 90° 海岭海域利用箱式取样器获取的 42 个表层沉积物, 取样水深范围为 2235~4744 m。每个站位选取表层 5 cm 的无扰动样品进行元素地球化学和粒度测试, 样品的预处理及测试分析在自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室完成。

粒度分析测试: 称取适量的沉积物样品, 加入约 15 mL 3% 的  $H_2O_2$  静置 24 h 以上除去有机质, 之后加入 3 mol/L 的稀 HCl 约 5 mL 静置 24 h 以上除去钙质组分, 待反应完全后, 离心清洗直至中性。超声振荡后上机测试。所用仪器为英国 Mastersizer3000 型激光粒度仪, 粒度仪分析范围为 0.02~2 000  $\mu m$ , 样品经重复测量, 相对误差小于 3%。采用矩法计算沉积物平均粒径<sup>[22]</sup>。

元素地球化学测试: 将待测样品冷冻干燥后, 研磨至 200 目, 放置烘箱 110 °C 烘干 2 h, 准确称取 50 mg 样品于聚四氟乙烯消解罐中, 加入 3 mL 1:1 的高纯  $HNO_3$  和 HF, 密闭后放置于烘箱中 190 °C 保持 48 h, 待样品冷却后置于电热板 150 °C 蒸干赶尽 HF 后加入 3 mL 50% 的  $HNO_3$ , 密闭后置于温度 150 °C 的烘箱中提取 8 h 以上, 冷却后移液定容待测。用电感耦合等离子体质谱( ICP-MS) 法测定 REE 含量, 用电感耦合等离子体发射光谱( ICP-OES) 法测定常量元素含量。测试分析过程严格控制流程

空白, 用 GSD-9 标样作为质控样, 选取 10% 重复样监测精密度, 测试相对误差小于 6%。

## 2 结果

### 2.1 粒度组成特征

东经 90° 海岭上 42 个表层沉积物砂组分的含量为 18.49%~53.38%, 平均含量 24.28%, 其空间分布表现为西南部含量高、东北部含量低; 粉砂组分的含量为 32.48%~56.45%, 平均含量 51.23%, 其空间分布特征与砂粒级组分分布相反; 黏土组分的含量为 14.15%~30.18%, 平均含量 24.49%, 其中粗黏土(8~10  $\Phi$ )平均含量较高, 细黏土占比小于 1%, 分布特征与粉砂组分含量的空间分布特征一致。从平均粒径来看, 研究区沉积物颗粒的空间分布整体上呈现西南部较粗、东北部较细的特征, 沉积物的分选性差(图 2)。

### 2.2 REE 含量及空间分布特征

研究区表层沉积物 REE 含量总体偏低, 稀土元素总含量( $\Sigma$ REE)为 26.37~156.80  $\mu g/g$ , 平均为 57.35  $\mu g/g$ ; 轻稀土元素含量( $\Sigma$ LREE)为 21.30~136.37  $\mu g/g$ , 平均为 47.77  $\mu g/g$ ; 重稀土元素含量

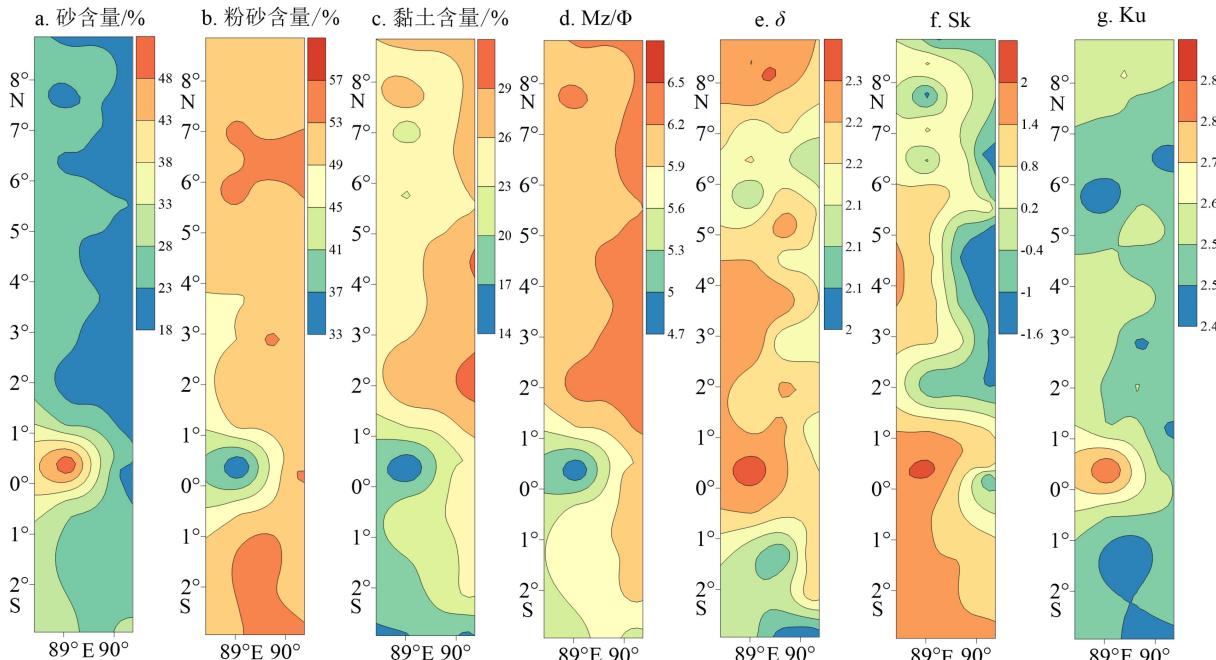


图 2 东经 90° 海岭 42 个表层沉积物粒度组成

a. 砂含量, b. 粉砂含量, c. 黏土含量, d. 平均粒径, e. 分选系数, f. 偏态, g. 峰态。

Fig.2 The grain size distribution of 42 surface sediments in the Ninetyeast Ridge

a. Sand content, b. silt content, c. clay content, d. mean grain size, e. sorting coefficient, f. skewness, g. kurtosis.

( $\sum$ HREE) 为 4.91~20.43  $\mu\text{g/g}$ , 平均为 7.94  $\mu\text{g/g}$ 。 $\sum$ LREE 明显较  $\sum$ HREE 高(表 1),  $\sum$ REE、 $\sum$ LREE、 $\sum$ HREE 在空间上均表现出南北高中间低的特征(图 3)。

### 2.3 REE 配分模式

一般认为球粒陨石作为地球原始物质不存在

分异现象, 本文将 42 个表层样品 REE 用球粒陨石进行标准化, 消除元素奇偶效应, 并反映样品的分异程度, 进而反映物源区地球化学特征<sup>[28]</sup>。从标准化后的 REE 配分图来看, 海岭区域表层沉积物 LREE 较富集, HREE 相对低而均一, 存在 Ce 负异常和 Eu 负异常(图 4)。

$\delta$ Eu 和  $\delta$ Ce 分别反映了 Eu 和 Ce 的异常程度。

表 1 东经 90° 海岭及周边区域沉积物 REE 组成

Table 1 REE composition of sediments of the Ninetyeast Ridge and adjacent areas

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\sum$ REE	$\sum$ LREE	$\sum$ HREE	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce	$(\text{La/Yb})_N$	$(\text{Sm/Nd})_N$
平均值	12.06	19.05	2.79	11.02	2.29	0.57	2.30	0.37	2.18	0.42	1.18	0.18	1.14	0.18	57.35	47.77	7.94	0.77	0.75	7.03	0.64
最小值	6.54	5.88	1.42	5.89	1.23	0.32	1.35	0.22	1.33	0.27	0.77	0.12	0.74	0.12	26.37	21.30	4.91	0.71	0.46	5.74	0.62
最大值	29.61	60.87	7.65	30.12	6.52	1.61	6.29	0.99	5.71	1.04	2.86	0.44	2.69	0.41	156.80	136.37	20.43	0.79	0.97	8.03	0.67
标准差	4.39	10.34	1.12	4.32	0.92	0.22	0.84	0.13	0.75	0.13	0.36	0.06	0.35	0.05	23.80	21.19	2.67	0.01	0.15	0.62	0.01
上陆壳	31.00	63.00	7.10	27.00	4.70	1.00	4.00	0.70	3.90	0.83	2.30	0.30	2.00	0.31	148.14	133.80	14.34	0.71	1.02	10.45	0.54
I	37.10	85.60	7.85	32.45	6.50	1.60	5.25	0.95	5.20	1.05	2.95	0.45	2.35	0.37	189.67	192.66	22.37	0.84	1.21	10.64	0.62
M	46.30	94.90	8.70	35.60	6.70	1.40	5.70	0.89	4.20	0.88	2.70	0.45	2.30	0.34	211.06	193.60	17.46	0.69	1.14	13.57	0.58
K-G	44.67	89.17	9.53	39.47	8.03	1.80	6.34	1.11	6.19	1.22	3.54	0.50	3.00	0.47	215.03	171.10	18.57	0.77	1.04	10.04	0.63
G-B	29.79	58.96	6.68	24.64	4.72	0.95	4.45	0.96	3.96	0.79	2.27	0.35	2.26	0.32	140.84	125.75	15.09	0.63	1.01	8.89	0.59
S	19.60	38.11	4.37	17.29	3.46	0.82	3.16	0.52	2.94	0.57	1.64	0.25	1.52	0.24	94.49	83.66	10.84	0.75	0.99	8.71	0.62

注: 表中各元素含量、 $\sum$ REE、 $\sum$ LREE、 $\sum$ HREE 单位为  $\mu\text{g/g}$ ;  $\delta$ Eu、 $\delta$ Ce、La/Yb 和 Sm/Nd 均经过球粒陨石标准化; 球粒陨石数据引自文献[23]; 上陆壳数据引自文献[24]; 伊洛瓦底江(I) 数据引自文献[25]; 默哈纳迪河(M) 和克里希纳-戈达瓦里河(K-G) 数据引自文献[26]; 恒河-布拉马普特拉河(G-B) 数据引自文献[27]; 苏门答腊岛(S) 数据为“全球变化与海气相互作用”专项“东印度洋 IND-CJ01 区块调查区块海底底质和底栖生物调查(GASI-02-IND-CJ01)”项目获取的苏门答腊岛西南部近岸海域 BS24 钻孔样品数据。

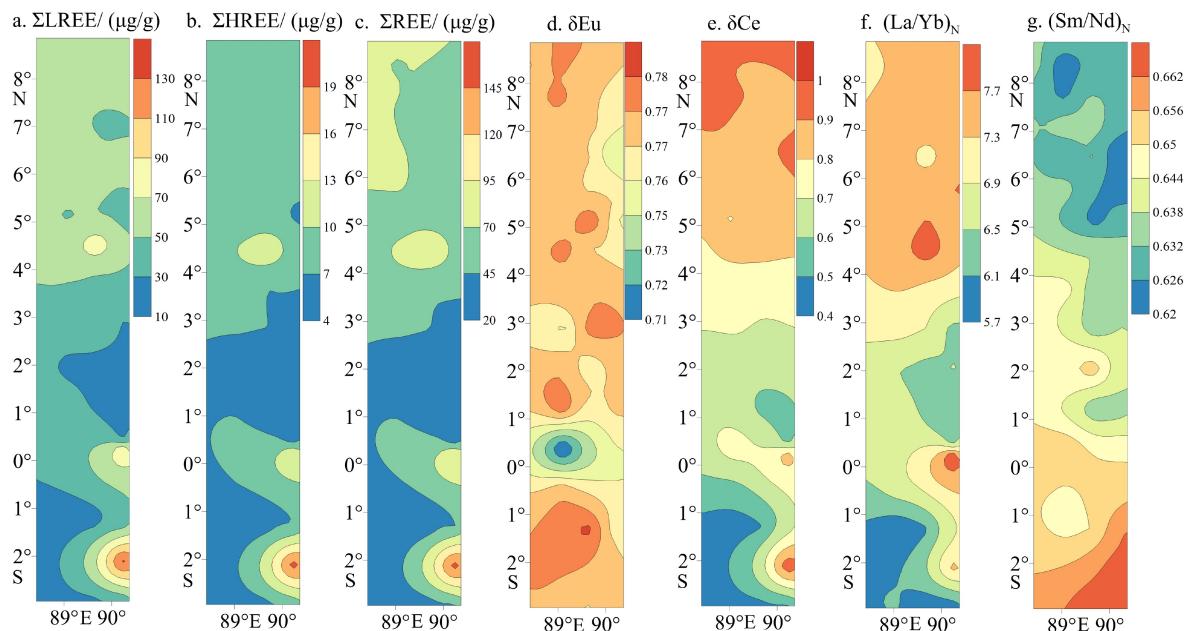


图 3 东经 90° 海岭 42 个表层沉积物 REE 分布

a.  $\sum$ LREE, b.  $\sum$ HREE, c.  $\sum$ REE, d.  $\delta$ Eu, e.  $\delta$ Ce, f.  $(\text{La/Yb})_N$ , g.  $(\text{Sm/Nd})_N$

Fig.3 REE composition of 42 surface sediments in the Ninetyeast Ridge

a.  $\sum$ LREE, b.  $\sum$ HREE, c.  $\sum$ REE, d.  $\delta$ Eu, e.  $\delta$ Ce, f.  $(\text{La/Yb})_N$ , g.  $(\text{Sm/Nd})_N$

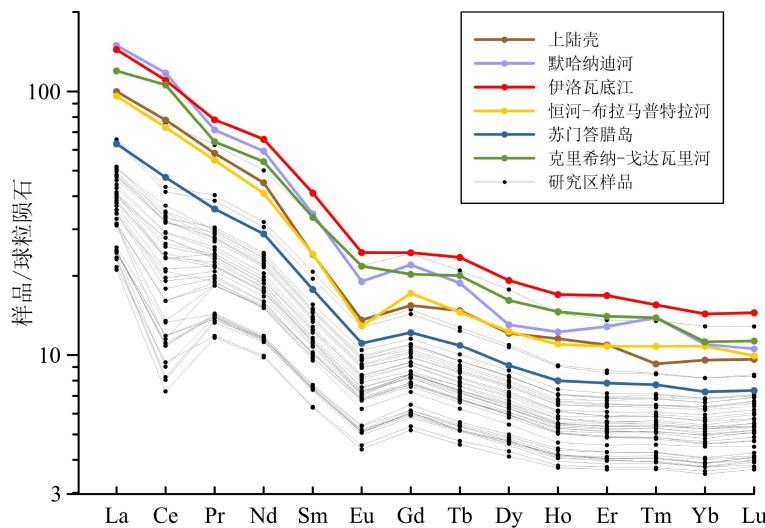


图 4 东经 90° 海岭表层沉积物及周边区域沉积物 REE 配分图

Fig.4 Distribution pattern of the REE composition of 42 surface sediments in the Ninetyeast Ridge and adjacent areas

海岭 42 个表层沉积物 REE 的  $\delta\text{Eu}$  值为 0.71~0.79, 平均值为 0.77, 而  $\delta\text{Ce}$  则为 0.46~0.97, 平均值为 0.75。

### 3 讨论

#### 3.1 REE 控制因素

沉积物中的 REE 含量主要受控于物源区岩石组分, 此外还受到沉积物类型等其他因素的影响<sup>[1,3]</sup>, 因此在用 REE 进行分析、追踪物源时, 应先对这些影响因素进行探讨。

重矿物对沉积物中 REE 含量有显著影响, 不同矿物中 REE 含量不同, 钆石、电气石、石榴石等富集 HREE, 角闪石、榍石、独居石、磷灰石等富集 LREE 和中稀土元素 (MREE)<sup>[29]</sup>。研究区沉积物总体偏细, 砂质组分平均含量为 24.28%, 这就导致本区域重矿物含量很低, 研究区北部的孟加拉下扇区重矿物总含量平均值仅为 0.04%, 而与 REE 密切相关的重矿物更是鲜有分布<sup>[30]</sup>。因此在海岭区域重矿物对 REE 分布的影响可以忽略。

REE 倾向于在黏土粒级沉积物中富集<sup>[31]</sup>, 而在粗颗粒沉积物中亏损, 因此沉积物的粒度可能会影响 REE 的分布。为此分析了平均粒径与  $\sum\text{REE}$  之间的线性关系(图 5), 二者之间的相关系数为 0.02, 没有明显相关性, 因此粒度对研究区 REE 的分布影响很小, 这可能主要受控于研究区低能沉积环境导致的沉积物均一化分布格局。

研究区沉积物与伊瓦洛底江、克里希纳-戈达瓦里河等河流以及苏门答腊岛样品的 REE 配分模式相似, 显示出强烈的陆源信号, 而沉积物中铁

元素与钛、铝(陆源指示元素)相关性极强, 相关性均接近于 1, 表明铁元素主要来源于陆源碎屑。铁元素与锰元素的相关性相对于陆源指示元素较低(相关性约为 0.6)(图 5), 说明海岭区域自生铁锰氧化物和氢氧化物的含量较低。因而陆源物质对研究区 REE 的影响占主导因素, 自生铁锰氧化物和氢氧化物的影响较小, 可以排除自生源物质对研究区 REE 组成的影响。

#### 3.2 REE 物源指示意义

研究区沉积方式为半远洋沉积<sup>[13]</sup>, 其北部表层沉积物粒度较细, 与安达曼海西部沉积物粒度接近<sup>[32]</sup>, 表明环流带来的安达曼海物质是北部区域沉积物组成的重要影响因素。

研究区 42 个站位的  $\sum\text{REE}$  与陆源物质的代表性元素 Ti 相关性很强( $R^2=0.95$ ), 说明陆源物质是影响本区域沉积物 REE 分布的主要因素。 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 、 $\sum\text{HREE}$  在空间上均表现出南北高中间低的特征, 表明研究区南北区域 REE 分布受到 2 个不同端元的控制(图 3)。

通常陆源物质的  $\sum\text{LREE}$  相对较高, 火山源物质  $\sum\text{HREE}$  相对较高, 几乎无 Eu 异常; 生物源物质的  $\sum\text{REE}$  较低, 而 MREE 轻微富集<sup>[33]</sup>。从 REE 的配分模式来看, 海岭表层沉积物与伊瓦洛底江、戈达瓦里河-克里希纳河、恒河-布拉马普特拉河等河流<sup>[25-27]</sup>以及苏门答腊岛近海样品的配分模式基本相似, LREE 含量高, HREE 缺乏, Eu 有明显负异常, 相对于海水中 HREE 稍富集的特征, 本区域沉积物表现出明显陆源属性; Ce 负异常主要与生物碳酸盐等自生沉积物有关, 碳酸盐含量越高,  $\delta\text{Ce}$  值越低<sup>[34]</sup>。研

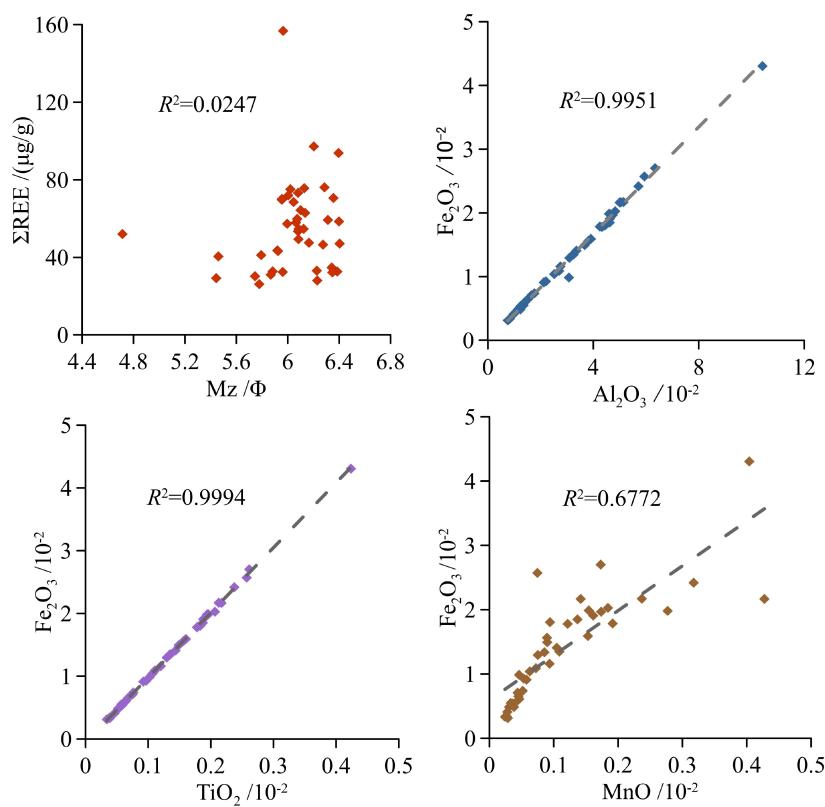


图 5 东经 90° 海岭 42 个表层沉积物 REE 与平均粒径及有关元素的相关性

Fig.5 Correlation between REE and mean grain size and related elements of 42 surface sediments on the Ninetyeast Ridge

究区气候温暖, 生物沉积作用强, 受其影响沉积物碳酸盐含量高<sup>[15]</sup>, 造成本区域沉积物有明显的 Ce 负异常。

上述分析表明, 研究区沉积物由陆源物质与生物源物质混合组成, 沉积物组成表现出明显的陆源属性, 但受到了一定程度的生物稀释作用。研究区位于孟加拉扇深海端、安达曼海和苏门答腊岛三者之间, 从研究区的地理位置、环流特征以及上述样品粒度和 REE 空间分布特征来看, 其陆源物质的潜在来源包括印度半岛及喜马拉雅山来源, 伊洛瓦底江来源和苏门答腊岛来源。从 REE 配分模式来看, 研究区表层沉积物与上述区域样品的 REE 配分模式也有一定相似性, 表明这几个端元可能影响着研究区的沉积物组成。

为分析研究区内不同区域的物质来源, 选取沉积物  $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$ 、 $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $\delta \text{Eu}$ 、 $\delta \text{Ce}$  等特征参数, 使用 SPSS 24 软件, 对 42 个表层沉积物采用组间距离法进行 Q 型聚类分析, 将特征相似的样品聚为一类。分析结果显示, 研究区的沉积物分为 3 种类型, 由北向南过渡为 3 个区域(图 6)。

考虑到研究区沉积物的  $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$  和  $\delta \text{Eu}$  与平均粒径相关性差, 粒度对其结果没有影响, 我们使

用  $(\text{Sm}/\text{Nd})_N - \delta \text{Eu}$  指标, 选取了伊洛瓦底江<sup>[25]</sup>、克里希纳-戈达瓦里河<sup>[26]</sup>、默哈纳迪河<sup>[26]</sup>、恒河-布拉马普特拉河<sup>[27]</sup>和“全球变化与海气相互作用”专项“东印度洋 IND-CJ01 区块调查区块海底底质和底栖生物调查(GASI-02-IND-CJ01)”项目获取的苏门答腊岛西南部近岸海域 BS24 钻孔样品数据绘制物源判别图, 对研究区表层沉积物的来源进行分析。由图 6 可知, 研究区沉积物的落点与恒河-布拉马普特拉河、默哈纳迪河范围均较远, 与克里希纳-戈达瓦里河范围接近但没有明显重合, 而与伊洛瓦底江的落点范围重合, 且越往北的站位, 与伊瓦洛底江的关系越近, I 区落点完全在伊洛瓦底江范围内, II 区部分落点在范围内。

此外, 我们使用判别函数  $F_D$  来验证上述结果, 寻找其他可能源区, 并判断研究区沉积物与不同物源之间的接近程度。本文选取  $\text{Sm}/\text{Nd}$  指标, 以伊洛瓦底江、克里希纳-戈达瓦里河和苏门答腊岛样品的平均值为端元, 计算研究区沉积物的  $F_D$  值, 计算方法为<sup>[35]</sup>:

$$F_D = |C_{ix} - C_{im}| / C_{im}$$

式中,  $i$  为两元素之比 ( $\text{Sm}/\text{Nd}$ );  $C_{ix}$  为研究区沉积物中 Sm、Nd 的比值;  $C_{im}$  为端元沉积物中 Sm、Nd 的比值。 $F_D$  值越小, 说明研究区沉积物与端元的关系

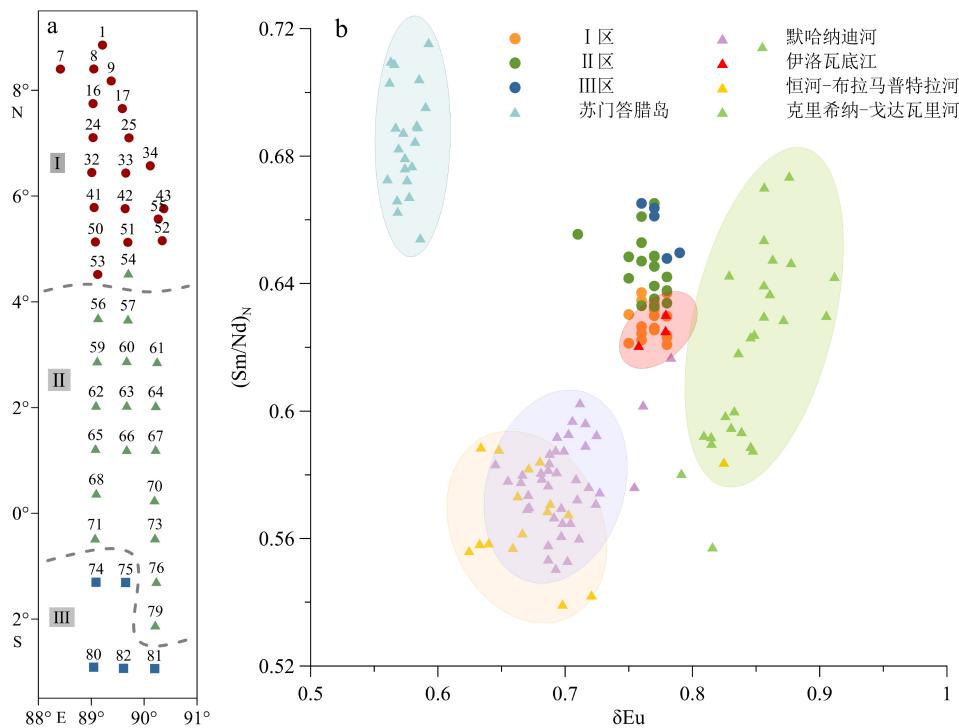


图 6 90°海岭表层沉积物分区 (a) 及物源定性判别 (b)

Fig.6 Different zones for the surface sediments of the Ninetyeast Ridge (a) and provenance identification (b)

越接近。

由表 2 可知, 位于海岭北部的 I 区沉积物与伊洛瓦底江和克里希纳-戈达瓦里河关系较为接近, 其中伊洛瓦底江影响程度明显更大。海岭北部的浊流活动带来的沉积物往往是细颗粒物质<sup>[12]</sup>, 但从表层沉积物的平均粒径分布特征来看(图 2), 研究区东北部的沉积物多为粉砂或粗黏土, 细黏土含量很少, 并且与安达曼海西部沉积物粒度特征接近<sup>[32]</sup>, 表明研究区北部更多地受到环流的影响, 其沉积物主要是环流带来的伊瓦洛底江物质, 而非浊流或风力带来的印度半岛细颗粒物, 物源判别图中 I 区与伊洛瓦底江落点范围重合也证明了这一点(图 6)。

位于研究区中部的 II 区与 3 个端元的  $F_D$  值接近, 为混合沉积区。II 区的粒度和 REE 特征与 I 区相似, 并且在物源判别图中(图 6) II 区与伊洛瓦底江落点范围有部分重合, 这表明海岭北部的浊流和环流活动仍影响着 II 区的物质搬运。此外, 根据 Kolla 等对东印度洋的黏土矿物研究, 海岭的 5°N 和 15°S 之间受到印尼群岛火山活动影响(II 区纬度范围大致在 4°N—1°S 之间), 海岭区的蒙脱石主要来源于印度尼西亚, 其主要运输动力是风<sup>[36]</sup>。

从  $F_D$  值来看, 位于研究区南部的 III 区沉积物与苏门答腊岛关系最为接近。与 I 区和 II 区相比, III 区沉积物的粒度和元素特征出现明显变化, 其沉积物平均粒径较粗(图 2), REE 含量较高(图 3), 并

表 2 东经 90°海岭表层沉积物 REE 判别函数 ( $F_D$ ) 计算结果

Table 2 The REE discrimination values for 42 surface sediments of the Ninetyeast Ridge

判别端元	沉积物分区		
	I 区	II 区	III 区
伊洛瓦底江	0.005	0.032	0.051
克里希纳-戈达瓦里河	0.011	0.037	0.057
苏门答腊岛	0.082	0.058	0.040

且在物源判别图中(图 6) III 区与伊洛瓦底江落点范围没有重合, 这表明在本区域环流和浊流的影响已经减弱, 而苏门答腊岛陆源物质成为影响沉积物分布特征的重要因素。结合张振芳等<sup>[12]</sup>对海岭上陆源物质运输机制的探讨, 研究区南部的陆源沉积物主要为赤道东风或东南季风带来的印尼群岛物质。此外, 研究区南部附近存在一支较强的赤道逆流<sup>[19]</sup>, 能够携带苏门答腊岛物质自西向东搬运。

综合研究区表层环流特点和上述分析结果, 研究区陆源沉积物存在 3 个来源: 研究区北部沉积物运输主要依靠环流, 夏季西南季风盛行时, 顺时针的孟加拉湾环流通过普雷帕里斯海峡, 将伊洛瓦底江河口输入物质运送至安达曼海, 冬季孟加拉湾表层环流继续向南流动, 汇合印度尼西亚沿岸的表层洋流, 将安达曼海的物质和苏门答腊岛沿岸物质,

通过十度海峡和格雷特海峡继续运送至东经 90°海岭中北部海域并沉积; 此外研究区北部的浊流活动能将印度半岛细颗粒物质搬运至海岭沉积。研究区南部沉积物主要来源于苏门答腊岛, 其主要运输动力为风<sup>[12]</sup>, 赤道南侧的一支较强赤道逆流也可能影响着苏门答腊岛的物质运输。

## 4 结论

(1) 东经 90°海岭 42 个表层沉积物中,  $\Sigma$ REE 变化范围为 26.37~156.80  $\mu\text{g/g}$ , 平均为 57.35  $\mu\text{g/g}$ 。经球粒陨石标准化后, REE 的配分模式表现为 LREE 富集, 具有明显陆源特征, HREE 相对缺乏而均一, 存在明显的 Ce 负异常和 Eu 负异常。

(2) 东经 90°海岭 42 个表层沉积物 REE 组成主要受源区岩石成分控制, 也受到一定的生物碳酸盐影响, 受沉积物粒度、类型和重矿物等的影响较小。基于 REE 主要特征参数可以将研究区分为 3 个区, 由北向南依次为 I 区、II 区、III 区。

(3) ( $\text{Sm}/\text{Nd}$ )<sub>N</sub>- $\delta$ Eu 物源判别图以及判别函数 ( $F_D$ ) 计算结果显示, I 区沉积物主要来源是伊洛瓦底江输入的陆源物质, 次要来源是克里希纳-戈达瓦里河陆源物质输入的印度半岛物质; II 区为伊洛瓦底江物质、印度半岛物质和苏门答腊岛物质的混合沉积区; III 区沉积物主要为赤道季风或赤道逆流带来的苏门答腊岛陆源物质。

**致谢:** “海测 3301”号调查船全体船员参与了研究区沉积物采集, 自然资源部第一海洋研究所李贞、崔菁菁、王小静、朱爱美协助进行了沉积物粒度和地球化学测试, 作者在此一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21 (1): 169-200.
- [2] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用 [J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33 (4): 337-348. [MAO Guangzhou, LIU Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33 (4): 337-348.]
- [3] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58 (22): 4955-4972.
- [4] Lim D, Jung H S, Choi J Y. REE partitioning in riverine sediments around the Yellow Sea and its importance in shelf sediment provenance [J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 12-24.
- [5] Um I K, Choi M S, Bahk J J, et al. Discrimination of sediment provenance using rare earth elements in the Ulleung Basin, East/Japan Sea [J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 208-219.
- [6] Liu S F, Zhang H, Zhu A M, et al. Distribution of rare earth elements in surface sediments of the western Gulf of Thailand: Constraints from sedimentology and mineralogy [J]. *Quaternary International*, 2019, 527: 52-63.
- [7] Mi B B, Liu S F, Shi X F, et al. A high resolution record of rare earth element compositional changes from the mud deposit on the inner shelf of the East China Sea: Implications for paleoenvironmental changes [J]. *Quaternary International*, 2017, 447: 35-45.
- [8] Curran J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19 (10): 1191-1223.
- [9] Curran J R. The Bengal depositional system: from rift to orogeny [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 59-69.
- [10] 方念乔, 丁旋, 刘勇勤, 等. 东经 90° 海岭的远洋沉积记录与晚新生代重大构造-环境事件 [J]. *地学前缘*, 2002, 9 (1): 103-111. [FANG Nianqiao, DING Xuan, LIU Yongqin, et al. Pelagic sedimentary records of the Ninetyeast Ridge and the Late Cenozoic important tectono-environmental events [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (1): 103-111.]
- [11] 方念乔, 陈学方, 丁旋, 等. 孟加拉湾和东经 90° 海岭 260 ka 以来的古海洋学记录与印度季风的影响 [J]. *中国科学 (D辑)*, 2001, 44 (1): 351-359. [FANG Nianqiao, CHEN Xuefang, DING Xuan, et al. Paleceanographical records under impact of the Indian monsoon from the Bengal Deep Sea Fan and Ninetyeast Ridge during the last 260 ka [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44 (1): 351-359.]
- [12] 张振芳, 方念乔, 吴琳, 等. 孟加拉湾东经 90° 海岭中上新世以来沉积记录及亚洲季风 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004, 29 (2): 157-162. [ZHANG Zhenfang, FANG Nianqiao, WU Lin, et al. Sedimentary records and Asian monsoon in ninetyeast ridge of bay of Bengal since Pliocene time [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29 (2): 157-162.]
- [13] 魏华玲, 方念乔, 丁旋, 等. 赤道东经 90° 海岭 3.5 Ma 以来远洋记录反映的重大环境事件 [J]. *地质通报*, 2007, 26 (12): 1627-1632. [WEI Hualing, FANG Nianqiao, DING Xuan, et al. Major environmental events reflected by pelagic records since 3.5 Ma BP in the Ninetyeast Ridge at the equator [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (12): 1627-1632.]
- [14] 尚鲁宁, 胡刚, 袁忠鹏, 等. 东北印度洋 85°E 海脊的性质和起源: 综述和新认识 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (4): 1-16. [SHANG Luning, HU Gang, YUAN Zhongpeng, et al. Tectonic structure and origin of the 85°E ridge, Northeastern Indian Ocean: A review and new observations [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (4): 1-16.]
- [15] 张振国, 方念乔, 李文宝, 等. 东经 90° 海岭远洋沉积物非碳酸盐组分的粒度特征及环境指示意义 [J]. *太原理工大学学报*, 2007, 38 (1):

- 85-87. [ZHANG Zhenguo, FANG Nianqiao, LI Wenbao, et al. The characteristics of the non-CaCO<sub>3</sub> grain size of pelagic sediment from the Ninetyeast Ridge and its indicated significance of environment [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2007, 38(1): 85-87.]
- [16] Kolla V, Moore D G, Curran J. Recent bottom-current activity in the deep western Bay of Bengal [J]. *Marine Geology*, 1976, 21(4): 255-270.
- [17] 李景瑞, 刘升发, 冯秀丽, 等. 孟加拉湾中部表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(4): 41-50. [LI Jingrui, LIU Shengfa, FENG Xiuli, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in mid-Bengal Bay and implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 41-50.]
- [18] Klootwijk C T, Gee J S, Peirce J W, et al. Neogene evolution of the Himalayan-Tibetan region: Constraints from ODP site 758, northern Ninetyeast ridge; bearing on climatic change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992, 95(1-2): 95-110.
- [19] 乔彬, 刘子洲, 张书颖, 等. 季风转换期东印度洋的赤道流系结构和水文特征 [J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(3): 301-305. [QIAO Bin, LIU Zizhou, ZHANG Shuying, et al. Equatorial current system structure and hydrologic characteristics in monsoonal wind transition period [J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(3): 301-305.]
- [20] 宣莉莉. 热带东印度洋上层海洋环流及其与孟加拉湾水交换的季节变化研究 [D]. 国家海洋局第三海洋研究所硕士学位论文, 2013. [XUAN Lili. Seasonal variation of the upper ocean circulation in the eastern tropical Indian Ocean and its water exchange with the Bay of Bengal [D]. Master Dissertation of Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2013.]
- [21] Song Z H, Wan S M, Colin C, et al. Paleoenvironmental evolution of South Asia and its link to Himalayan uplift and climatic change since the late Eocene [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 200: 103459.
- [22] McManus J. Grain size determination and interpretation [M]//Tucker M. Techniques in Sedimentology. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1988: 63-85.
- [23] Evensen N M, Hamilton P J, O'Nions R K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(8): 1199-1212.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [25] Garzanti E, Wang J G, Vezzoli G, et al. Tracing provenance and sediment fluxes in the Irrawaddy River basin (Myanmar) [J]. *Chemical Geology*, 2016, 440: 73-90.
- [26] Mazumdar A, Kocherla M, Carvalho M A, et al. Geochemical characterization of the Krishna-Godavari and Mahanadi offshore basin (Bay of Bengal) sediments: A comparative study of provenance [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 60: 18-33.
- [27] Garzanti E, Andó S, France-Lanord C, et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1-2): 107-120.
- [28] 孔祥淮, 刘健, 李巍然, 等. 山东半岛东北部滨海区表层沉积物的稀土元素及其物源判别 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3): 51-59. [KONG Xianghuai, LIU Jian, LI Weiran, et al. Geochemistry of REE and provenance of surface sediments in the littoral area of the northeastern Shandong peninsula [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(3): 51-59.]
- [29] 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]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 14(2): 164-167.]
- [30] 孙兴全, 刘升发, 李景瑞, 等. 孟加拉湾南部表层沉积物稀土元素组成及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(2): 80-89. [SUN Xingquan, LIU Shengfa, LI Jingrui, et al. Rare earth element composition of the surface sediments from the south Bay of Bengal and its implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(2): 80-89.]
- [31] Cullers R L, Barrett T, Carlson R, et al. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1987, 63(3-4): 275-297.
- [32] 曹鹏, 石学法, 李巍然, 等. 安达曼海东南部海域表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 57-67. [CAO Peng, SHI Xuefa, LI Weiran, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in southeastern Andaman Sea and implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 57-67.]
- [33] 刘建国, 陈忠, 颜文, 等. 南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素地球化学特征 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2010, 35(4): 563-571. [LIU Jianguo, CHEN Zhong, YAN Wen, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in the fine-grained fraction of surface sediment from South China Sea [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(4): 563-571.]
- [34] Holser W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 132(1-4): 309-323.
- [35] 王爱萍, 杨守业, 李从先. 南京地区下蜀土元素地球化学特征及物源判别 [J]. 同济大学学报, 2001, 29(6): 657-661. [WANG Aiping, YANG Shouye, LI Congxian. Elemental geochemistry of the Nanjing Xiaoshu loess and the provenance study [J]. *Journal of Tongji University*, 2001, 29(6): 657-661.]
- [36] Venkatarathnam K, Biscaye P E. Clay mineralogy and sedimentation in the eastern Indian Ocean [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1973, 20(8): 727-738.