

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019102801

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

孙兴全^{1,2,3}, 刘升发^{2,3}, 李景瑞^{2,3}, 曹鹏^{2,3}, 张辉², 赵广涛¹, Somkiat Khokiattiwong⁴, Narumol Kornkanitnan⁴, 石学法^{2,3}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 自然资源部第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质自然资源部重点实验室, 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 266061

4. Marine and Coastal Resources Research and Development Institute, Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok 10210, Thailand

摘要: 基于孟加拉湾南部98个表层沉积物的稀土元素组成及其空间分布特征, 判別了研究区表层沉积物主要来源, 并结合水动力环境等探讨了孟加拉湾南部区域沉积物输运方式。结果表明, 研究区表层沉积物稀土元素总含量范围为67.62~180.67 $\mu\text{g/g}$, 其平均值为100.85 $\mu\text{g/g}$, 且具有轻稀土富集、重稀土均一、明显的Eu负异常的特征。基于稀土元素主要参数, 可将研究区分为两个区域, I区位于研究区西部, II区位于研究区东部。根据球粒陨石标准化后的La/Yb-Sm/Nd物源判別图解可知, 研究区表层沉积物的最主要来源为恒河-布拉马普特拉河搬运的喜马拉雅山侵蚀物质, 其对整个研究区均有重要影响; 次要来源为戈达瓦里河-克里希纳河输送的印度半岛物质, 其主要影响范围为研究区西侧的I区。不同源区沉积物在研究区的输运过程主要受控于季节性表层环流, 其驱动力为印度季风系统。

关键词: 孟加拉扇; 稀土元素; 物质来源; 季风环流; 东北印度洋

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

Rare earth element composition of the surface sediments from the south Bay of Bengal and its implications for provenance

SUN Xingquan^{1,2,3}, LIU Shengfa^{2,3}, LI Jingrui^{2,3}, CAO Peng^{2,3}, ZHANG Hui², ZHAO Guangtao¹, Somkiat Khokiattiwong⁴, Narumol Kornkanitnan⁴, SHI Xuefa^{2,3}

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

2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, 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 266061, China

4. Marine and Coastal Resources Research and Development Institute, Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok 10210, Thailand

Abstract: Rare earth element (REE) compositions and their spatial distribution pattern for 98 surface sediment samples collected from the southern part of the Bay of Bengal are carefully studied in this paper. The main sources of sediments are identified and the sediment transport modes discussed in combination with the hydrodynamic environment features. The results suggest that the total concentrations of rare earth elements in the surface sediments of the study area vary between 67.62 $\mu\text{g/g}$ and 180.67 $\mu\text{g/g}$, with an average at 100.85 $\mu\text{g/g}$. The samples are rich in light REE and uniform in heavy REE with an obvious negative anomaly of Eu. Based on the major parameters of REE, the study area can be subdivided into two provinces, the province I located in the west part of the study area and the province II located in the east. According to the chondrite-normalized La/Yb-Sm/Nd diagram for provenance identification, most of the surface sediments of the study area is provided by the erosion of the Himalayan Mountain and transported by the Ganges-Brahmaputra River. The subordinate source is the Indian Peninsula, of which the sediments were transported by the Godavari River-Krishna River in the province I located in the west part of the study area. The

资助项目: “全球变化与海气相互作用”专项“东印度洋 IND-CJ03 区块海底底质和底栖生物调查”(GASI-02-IND-CJ03), “全球变化与海气相互作用”专项“亚洲大陆边缘“源-汇”过程与陆海相互作用”(GASI-GEOGE-03)

作者简介: 孙兴全(1991—), 男, 博士生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: sunxingquan2010@163.com

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

收稿日期: 2019-10-28; **改回日期:** 2019-12-18. 文凤英编辑

transportation of sediments in different source areas is mainly controlled by the seasonal surface circulation driven by the Indian monsoon system.

Key words: Bengal Fan; Rare earth elements; Provenance; Monsoon circulation; Northeast Indian Ocean

1 区域地质背景

孟加拉湾是位于印度洋东北部的半封闭式海湾, 总面积为 $217.2\times10^4\text{ km}^2$, 平均水深 2 586 m, 是世界第一大海湾。孟加拉湾周边河流众多, 每年携带大量陆源物质入海^[1-2](表 1), 充足的沉积物供给在此形成了世界上最大的深海浊积扇——孟加拉扇^[3-4]。孟加拉湾的表层流系对湾内的沉积物输运影响显著, 受印度季风影响, 研究区夏季盛行西南季风, 冬季盛行东北季风, 导致其表层环流冬季呈逆时针方向, 夏季呈顺时针方向; 孟加拉湾西部的东印度沿岸流在冬季风作用期间沿印度东岸和斯里兰卡向南流, 在夏季风期间大致以 10°N 为界, 10°N 以北为北向沿岸流, 以南则为南向沿岸流^[5-6](图 1)。

作为亚洲大陆典型的边缘海, 孟加拉湾是喜马拉雅山和青藏高原侵蚀物质的重要“汇”区, 同时也接收来自印度大陆、东南亚等地区的陆源物质, 其海底沉积物中蕴含了丰富的“源”区信息, 是研究海洋沉积物“源-汇”过程的理想区域^[7-9]。目前已有众多关于孟加拉湾沉积物来源的研究, 研究结果大多认为陆源碎屑物质是孟加拉湾沉积物的主要类型, 而沉积物的主要来源是恒河-布拉马普特拉河所搬运的喜马拉雅山侵蚀物质, 另有少部分来自印度半岛和东南亚^[7, 10-12]。浊流作用是孟加拉湾的优势沉积过程, 在孟加拉扇体表面发现了大量的沉积物输运通道, 但这些水道多已废弃, 仅有一条“活跃水道”与北部的“无底大峡谷”相连(图 1), 它被认为是目前唯一活跃的水道^[13]。受控于水道内的浊流及其溢流作用, 在孟加拉湾中部尤其是水道附近区

域的沉积物多认为主要为喜马拉雅单一物源^[8, 14], 而在孟加拉湾的西部和东部除喜马拉雅山以外, 又分别受到次要源区印度半岛和缅甸物质的影响^[9, 15-17]。在目前高海平面时期, 浊流活动相对较弱, 尤其是在孟加拉扇的下扇区, 浊流活动几乎已停止^[3, 12], 这必然使得表层悬浮体沉降带来的印度大陆和东南亚物质信号有所增强, 然而该区域在现今高海平面条件下的物质来源问题尚不清晰, 尤其缺少大范围高密度的表层取样研究, 这限制了对孟加拉湾“源-汇”过程的整体认识。

稀土元素倾向于在细颗粒物质及一些重矿物中富集, 在表生环境中物理化学性质比较稳定, 主要受物源区源岩类型控制, 风化剥蚀、搬运和沉积的过程中稀土元素组成变化较小^[18-20], 是研究细颗粒沉积物来源的有效指标, 在示踪物源方面得到了广泛的应用并取得良好效果^[2, 21-24]。为此, 本文使用孟加拉湾南部表层沉积物的稀土元素数据, 分析了稀土元素的空间分布特征及其配分模式, 并利用稀土元素分异参数对表层沉积物的来源进行了识别, 进而结合本区域周边河流的稀土元素组成特征及海洋水动力条件探讨了沉积物的输运方式, 以期为理解热带印度洋的“源-汇”过程提供理论支撑, 并为全球其他深海沉积物来源和输运模式研究提供一定的理论依据。

2 材料与方法

本文使用样品为自然资源部第一海洋研究所于 2018 年 1—3 月在孟加拉湾南部(孟加拉扇下扇区)利用箱式取样器获取的 98 个表层沉积物样品, 具

表 1 孟加拉湾周边河流概况^[1-2]
Table 1 An overview of the rivers around the Bay of Bengal

名称	长度/km	流域面积/ 10^3 km^2	流量/ (km^3/a)	悬浮沉积物通量/ (Mt/a)	溶解质通量/ (Mt/a)
恒河	2 200	980	490	520	91
布拉马普特拉河	2 600	670	630	540	63
默哈纳迪河	900	140	54	61	8.1
戈达瓦里河	1 400	310	120	170	20
克里希纳河	1 300	260	62	64	22
伊洛瓦底江	2 300	430	430	360	98

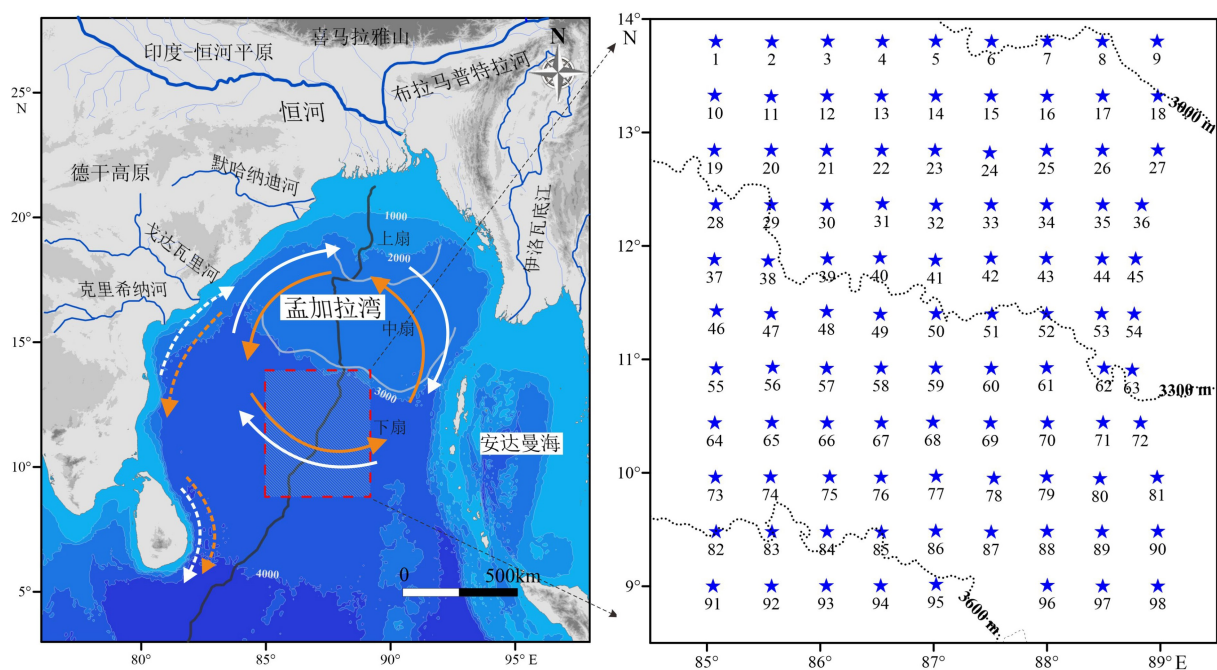


图 1 研究区地理位置和取样站位分布

白色箭头为夏季表层环流, 橙色箭头为冬季表层环流, 虚线箭头为东印度沿岸流, 红色虚线框为研究区; 表层环流根据文献 [5-6] 改绘。

Fig.1 Location of the study area and sampling sites

The white arrow indicates the summer circulation, the orange arrow the winter circulation, and the dotted arrow the East Indian Coastal Current. The red dotted frame indicates the study area. Circulation patterns are modified from [5-6].

体取样位置详见图 1, 取样水深范围为 2 930~3 663 m。对各站位表层沉积物样品(0~5 cm)分别进行粒度和元素地球化学分析测试。样品的预处理及测试分析均在海洋沉积与环境地质自然资源部重点实验室完成。

粒度分析测试首先称取适量的沉积物样品, 加入约 15 mL 的 3% 双氧水静置 24 h 以上, 以去除有机质, 之后加入 3 mol/L 的稀盐酸约 5 mL 静置 24 h 以上, 以去除钙质组分, 待反应完全后, 离心清洗直至中性, 接下来经超声振荡使颗粒充分分散, 最后进行上机测试。所用仪器为英国 Master sizer 2000 型激光粒度仪, 仪器分析范围为 0.02~2 000 μm , 样品重复测量相对误差小于 3%。沉积物平均粒径采用矩法计算 [25-26]。

经过冷冻干燥后, 使用玛瑙研钵将待测沉积物研磨至 200 目, 烘箱烘干, 称取 50 mg 样品于聚四氟乙烯消解罐中, 使用高纯硝酸和氢氟酸按照 1:1 比例混合的溶液充分溶解样品, 烘箱温度 190 $^{\circ}\text{C}$ 保持 48 h, 待样品冷却之后使用电热板蒸干, 而后加入 3 mL 50% 的 HNO_3 , 放置于温度 150 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中继续溶样 8 h 以上, 移液后定容待测。沉积物稀土元素含量使用等离子体质谱分析方法(ICP-MS)测定, 在样品测试分析过程中, 用国家一级标准物质 GSD-9、

空白样品和重复样进行质量控制, 测试结果显示, 标样和重复样合格率为 100%, 样品与标样的相对误差小于 6%, 稀土元素重复样的相对误差小于 5%。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对表层沉积物的常量元素进行测试, 常量元素数据已在我们之前的研究工作中使用并发表, 实验方法及数据分析等详见文献 [25]。

3 结果

3.1 稀土元素含量及空间分布特征

研究区 98 个表层沉积物的稀土元素总含量范围为 67.62~180.67 $\mu\text{g/g}$, 其平均值为 100.85 $\mu\text{g/g}$ (表 2), 与深海黏土的稀土元素总含量(411.96 $\mu\text{g/g}$) [27] 存在较大差异, 而更为接近上陆壳物质的稀土元素总含量(146.37 $\mu\text{g/g}$) [28] 和孟加拉湾周边主要河流沉积物的稀土元素总含量 [29-31] (表 2)。稀土元素总含量在空间分布上表现出西高东低的变化趋势(图 2), 西部区域多在 105 $\mu\text{g/g}$ 以上, 而东部区域其含量则多小于 95 $\mu\text{g/g}$ 。稀土元素总含量与研究区表层沉积物平均粒径的相关性较弱($R^2=0.12$), 而与陆源碎屑物质的代表性元素钛的相关性极高($R^2=0.83$) (图 3),

表 2 研究区及周边河流稀土元素含量及分异参数

Table 2 Rare earth elements composition and differentiation parameters of sediments of the study area and adjacent rivers

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	总稀 土	总轻稀土/ 总重稀土	δEu	δCe	La/Yb	Sm/Nd
平均值	19.98	41.88	4.66	18.08	3.62	0.97	3.40	0.54	3.17	0.60	1.72	0.27	1.69	0.27	100.85	7.59	0.85	1.04	7.90	0.62
最大值	35.67	80.24	8.18	30.92	5.94	1.52	5.48	0.88	4.90	0.91	2.63	0.42	2.59	0.41	180.67	8.92	0.97	1.14	9.30	0.66
最小值	13.90	25.47	3.22	12.75	2.59	0.78	2.57	0.40	2.37	0.46	1.33	0.22	1.33	0.21	67.62	6.49	0.75	0.92	6.84	0.59
标准偏差	3.60	9.15	0.83	3.00	0.55	0.11	0.46	0.07	0.39	0.07	0.19	0.03	0.18	0.03	18.53	0.59	0.04	0.06	0.62	0.14
上陆壳	30.00	64.00	7.10	26.00	4.50	0.88	3.80	0.64	3.50	0.80	2.30	0.33	2.20	0.32	146.37	9.54	0.65	1.06	9.19	0.53
伊洛瓦底江	33.00	67.29	7.29	25.71	4.71	0.91	3.91	0.61	3.49	0.67	2.04	0.33	2.04	0.33	152.34	10.39	0.69	1.03	10.98	0.58
默哈纳迪河	46.21	94.87	8.67	35.59	6.69	1.41	5.74	0.89	4.20	0.88	2.71	0.45	2.36	0.34	211.03	10.99	0.70	1.14	13.20	0.58
戈达瓦里-克里希纳河	38.85	91.38	8.20	33.70	6.79	1.70	5.53	1.03	5.47	1.10	3.09	0.46	2.50	0.37	200.16	10.49	0.85	1.22	10.49	0.62
恒河-布拉马普特拉河	49.07	100.13	11.27	41.60	8.14	1.37	6.87	1.06	6.11	1.17	3.31	0.49	3.37	0.52	234.48	9.06	0.60	1.02	9.63	0.60

注: 稀土元素含量单位为 $\mu\text{g/g}$; δEu 、 δCe 、 La/Yb 和 Sm/Nd 均为经球粒陨石标准化后的值。上陆壳数据引自文献[28]; 伊洛瓦底江数据引自文献[29]; 默哈纳迪河和戈达瓦里-克里希纳河数据引自文献[30]; 恒河-布拉马普特拉河数据引自文献[31]; 球粒陨石数据引自文献[32]。

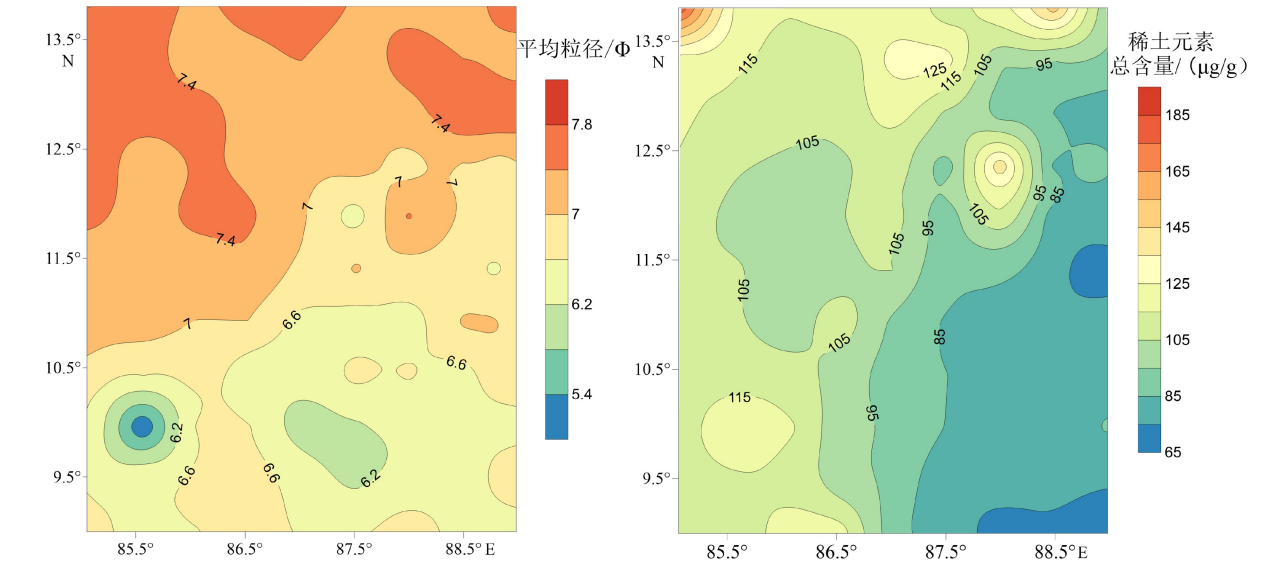


图 2 研究区表层沉积物平均粒径(左)和稀土元素总含量平面分布(右)图

Fig.2 Distributions of mean grain size (left) and total concentrations of rare earth elements (right) of the surface sediments of the study area

从而显示出明显的“陆源”属性。

3.2 稀土元素配分模式

本次研究采用球粒陨石^[32]对稀土元素进行标准化,经标准化后的配分模式见图 4。研究区 98 个表层沉积物的稀土元素配分模式具有明显的 Eu 负异常、无明显的 Ce 异常、轻稀土含量明显富集(La-Eu)和重稀土含量相对均一(Gd-Lu)的特点。一般而言,相比于火山源和生物源物质,陆源物质的轻稀土元素表现为异常富集;而火山源物质的特点是 Eu 几乎无异常和重稀土元素轻微富集;相比之下,生物源物质的稀土元素总含量要低得多,中稀土元

素则显示为轻微富集^[33]。从研究区表层沉积物稀土元素的配分模式来看,可推断其主要来源为陆源碎屑。

δEu 和 δCe 是表征稀土元素分异特征的重要参数,常用于反映沉积环境的变化^[2]。经球粒陨石标准化后,研究区表层沉积物稀土元素的 δEu 值为 0.75~0.97,其平均值为 0.85,而 δCe 则为 0.92~1.14,其平均值为 1.04。这说明相对于球粒陨石,所研究沉积物的稀土元素组成已发生了明显分异,其分异程度与上陆壳的稀土元素相近,也与恒河-布拉马普特拉河、戈达瓦里河-克里希纳河等河流沉积物接近(表 2)。

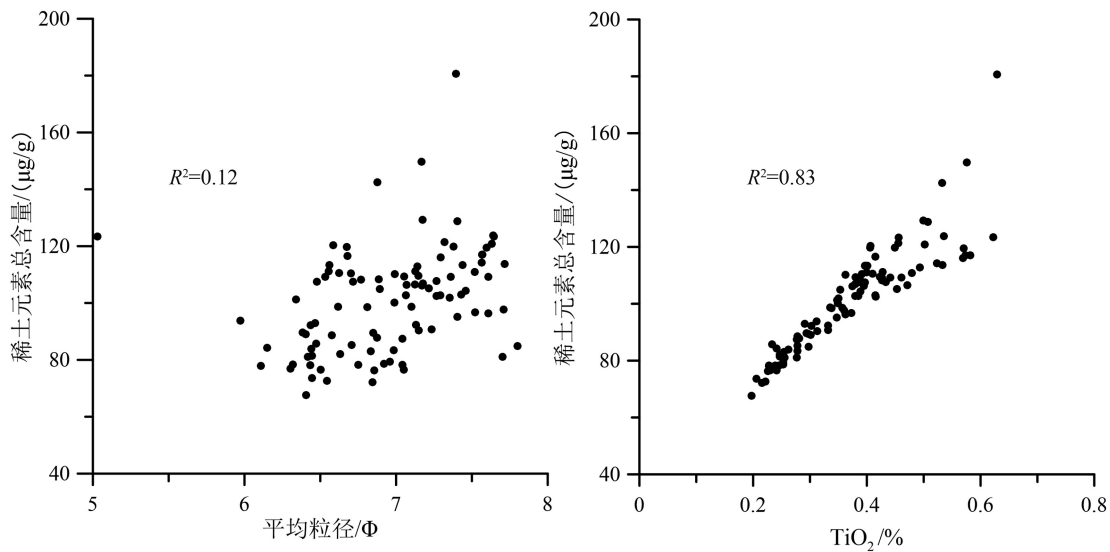


图3 研究区表层沉积物稀土元素总含量与平均粒径和 TiO_2 相关图

Fig.3 Correlation between total concentrations of rare earth elements, mean grain size, and TiO_2 in the surface sediments of the study area

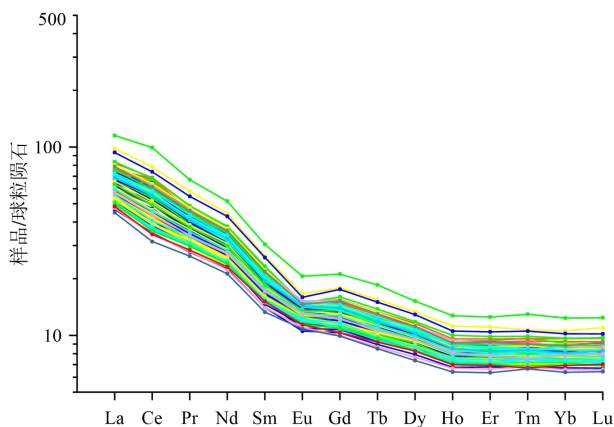


图4 研究区表层沉积物稀土元素总含量配分模式图

Fig.4 Chondrite-normalized rare earth elements distribution pattern of the surface sediments in study area

4 讨论

4.1 稀土元素控制因素分析

作为沉积物来源识别的常用指标,稀土元素主要在碎屑矿物的晶格中赋存,在沉积过程中表现为较强的惰性,因此,沉积物的稀土元素组成基本反映了物源区源岩的属性特征^[19-20]。然而,除受物源控制之外,海洋沉积物中的稀土元素含量和组成特征还可能受到风化剥蚀与河流输运过程、自生铁锰氧化物和氢氧化物、重矿物、自生碳酸盐以及沉积物粒度的影响^[34-35],在判定物源之前有必要对这些影响因素进行评估。

轻、重稀土元素在化学分化过程中所表现出的活泼性不同,相比于轻稀土元素,重稀土元素的带

出能力更强,容易在风化剥蚀与河流输运过程中以溶液的形式发生迁移,而轻稀土元素则更加倾向于在风化残余物中富集^[34, 36-37]。对恒河-布拉马普特拉河河流剖面的研究显示^[31, 38],造成河流深度剖面上沉积物的化学蚀变指数和风化指数变化的主要原因是水动力的分选作用而非强烈的化学风化;河底床沉积物的化学蚀变指数与喜马拉雅源岩接近,且河流悬浮沉积物和底床推移质与研究区表层沉积物的稀土元素配分模式相似,均显示出相近的轻稀土元素富集和较为平坦的重稀土元素的特点(图5),这说明风化剥蚀与河流输运过程不会对我们使用稀土元素特征来判别研究区表层沉积物的来源产生明显的影响。

研究区表层沉积物中的铁元素与锰元素的相关性较差($R^2=0.24$)(图6),而与陆源指示元素铝、钛具有很强的相关性。因子分析结果显示铁元素与铝、钛、镁、钾等成岩元素受同一因子控制^[25],这表明研究区铁元素主要来自陆源碎屑,而非自生氧化物和氢氧化物。同时,相关分析表明,研究区表层沉积物中的锰元素与稀土元素总含量相关性很低($R^2=0.08$)(图6),表明其对稀土元素的影响较小,因此,自生铁锰氧化物和氢氧化物在本区域对稀土元素的影响可以排除。

海洋沉积物中重矿物含量及类型对稀土元素组成有较大的影响,其中,重稀土元素易于在锆石、石榴子石等矿物中富集,轻稀土元素则在角闪石、榍石、独居石、磷灰石等矿物中含量较高^[39]。研究区表层沉积物中重矿物含量极低,重矿物总含量范围为0.001%~0.27%,平均值仅为0.04%,而与稀土

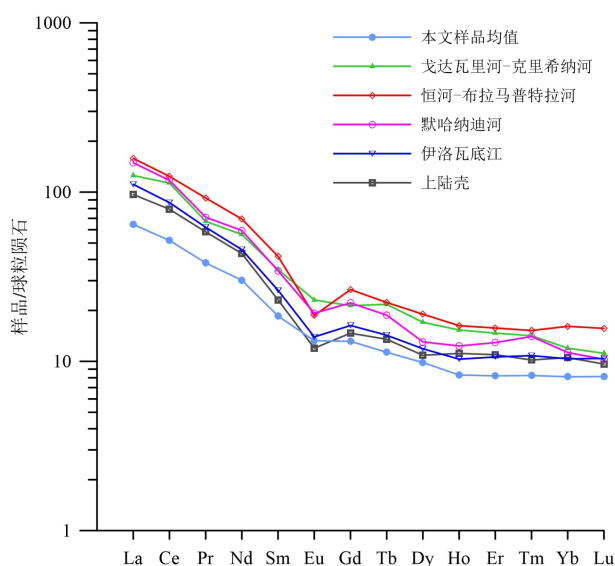


图 5 研究区表层沉积物稀土元素平均值与周边河流稀土元素配分模式

上陆壳数据引自文献 [28]; 伊洛瓦底江数据引自文献 [29]; 默哈纳迪河和戈达瓦里-克里希纳河数据引自文献 [30]; 恒河-布拉马普特拉河数据引自文献 [31]。

Fig.5 Chondrite-normalized rare earth elements distribution pattern of the average REE composition in study area and adjacent rivers

Upper continental crust data from [28]; Irrawaddy data from [29];

Mahanadi and Godavari-Krishna data from [30];

Ganga-Brahmaputra data from [31].

元素密切相关的重矿物更是鲜有分布^[40], 说明在本研究区重矿物对稀土元素空间分布的影响可以忽略。

一般情况下, 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, δCe 值越低^[41], 研

究区表层沉积物稀土元素 Ce 负异常不明显, δCe 值为 0.92~1.14, 平均值为 1.04(图 4), 因此, 可以认为海洋自生碳酸盐对研究区稀土元素影响很小。

沉积物的粒度对稀土元素有重要影响, 稀土元素趋向于在细粒沉积物中富集^[34], 研究区表层沉积物粒度较细, 且较均匀, 平均粒径集中于 6.0~7.8 Φ , 且平均粒径与稀土元素总含量(图 3)等参数相关性较小, 因此, 粒度对研究区稀土元素组成起次要作用。综合以上分析我们认为, 研究区表层沉积物稀土元素组成及分异特征主要受沉积物来源影响。

4.2 稀土元素物源指示

从上文的分析中可以看出, 研究区表层沉积物稀土元素组成具有明显的陆源属性, 且受除物源以外的其他因素影响较小, 可以用于识别本区域沉积物陆源组分的来源。从研究区的地理位置、环流特征及前人的研究成果来看^[2, 7, 9, 16, 42-44], 研究区陆源物质的潜在来源包括: 通过恒河-布拉马普特拉河搬运而来的喜马拉雅山的物质, 通过戈达瓦里河-克里希纳河、默哈纳迪河等河流入海的印度半岛物质以及通过伊洛瓦底江输入的缅甸地区的物质。研究区表层沉积物稀土元素的平均值与周边河流稀土元素的配分模式有较好的一致性(图 6), 说明沉积物来源可能与它们都有关。

为了进一步分析研究区各区域稀土元素组成特征及其物质来源, 我们选取稀土元素总含量、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 、 δEu 和总轻稀土/总重稀土等特征参数, 使用 SPSS 19 软件, 对研究区表层沉积物

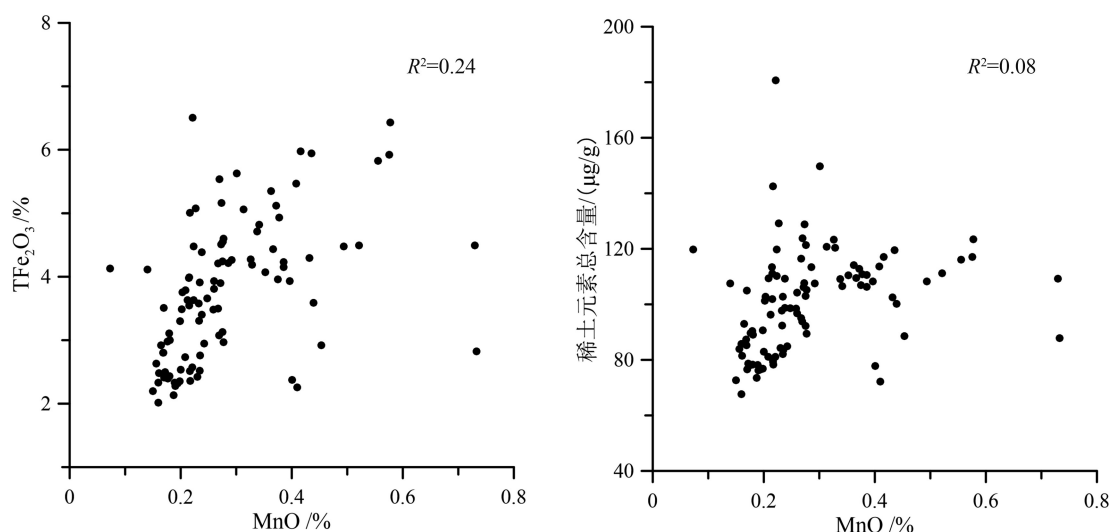


图 6 MnO 与 TFe_2O_3 和稀土元素总含量之间的相关性

Fig.6 Correlation between MnO, TFe_2O_3 , and total concentrations of rare earth elements

站位进行聚类分析(图7),结果显示研究区大致可以分为东西两个区域,西侧I区沉积物相比于东侧的II区沉积物总稀土元素值明显较高,且普遍具有更高的 $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 和更低的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$,这可能是不同源区物质在空间上分布的差异导致。

本文使用 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 物源识别图对孟加拉湾南部表层沉积物来源进行识别。由图8可见,研究区表层沉积物落点与伊洛瓦底江和默哈纳迪河距离较远,而与恒河-布拉马普特拉河最为接近,尤其是位于东侧的II区沉积物几乎全部在恒河-布拉马普特拉河落点范围内。恒河-布拉马普特拉河是本区最重要的河流系统,每年携带大量来自喜马拉雅山的侵蚀物质入海,从本次的物源识别结果来看,恒河-布拉马普特拉河无疑是孟加拉扇下扇区表层沉积物最重要的物质供应者。位于西侧的I区沉积物绝大多数则位于恒河-布拉马普特拉河与戈达瓦里河-克里希纳河之间,说明研究区的西侧沉积物受到来自印度半岛河流戈达瓦里河-克里希纳河沉积物的影响,表现为明显的混合来源。

因此,基于稀土元素的物源识别结果,我们认为研究区表层沉积物的主要物质来源为喜马拉雅山和印度半岛,且喜马拉雅山为最重要源区,印度半岛物质主要对研究区西侧沉积物产生影响。

4.3 孟加拉湾南部细颗粒物物质输运方式

孟加拉扇是世界上最大的深海浊积扇,扇体沉积物受浊流及其溢流作用影响重大,来自喜马拉雅山的大量侵蚀产物通过浊流作用,经由海底峡谷和水道搬运至深海并沉积下来[3,9,45]。与北部陆架“无底大峡谷”连接的“活跃水道”被认为是目前唯一活跃的浊流通道[4,46-47]。孟加拉扇中扇区沉积物的物源分析显示,“活跃水道”在该区沉积物输运中扮演着最重要的角色,表层环流则起着次要作用[8,42,44]。而在现今高海平面时期,河流输送的沉积物绝大部分被陆架捕获,海底浊流活动较低海平面时期大大减弱[3,9],沉积中心由深海移至陆架[48],在这种条件下,浊流及其溢流仅发生在上扇和中扇区,而对下扇区几乎不产生影响[3,12,49]。

受海岭阻隔,孟加拉湾等深流活动主要出现在 85°E 以西[50]。在冰期,较强的东北季风可能带来来自青藏高原的粉尘[49,51],但在现阶段这对研究区的影响可以忽略,因为此时的东北季风相比于冰期已大大减弱[52]。河流冲淡水所携带的陆源碎屑可以在洋流的作用下搬运至下扇区[49],这也成为研究区陆源物质输送的主要形式。

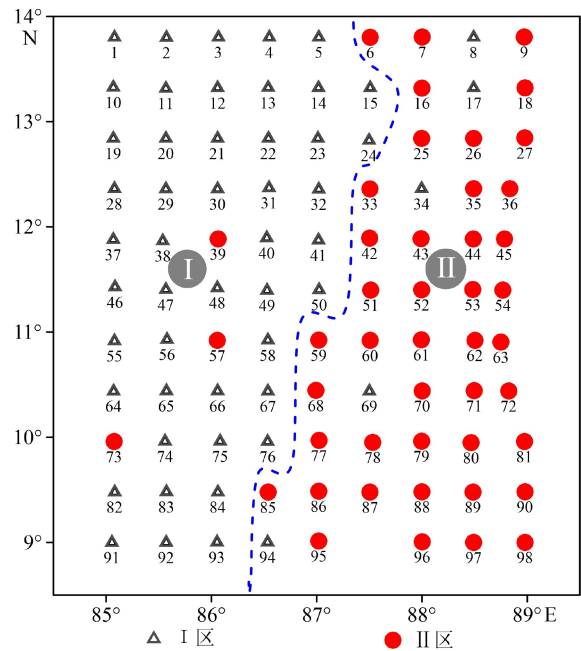


图7 稀土元素聚类分区图

Fig.7 Cluster partition map of rare earth elements

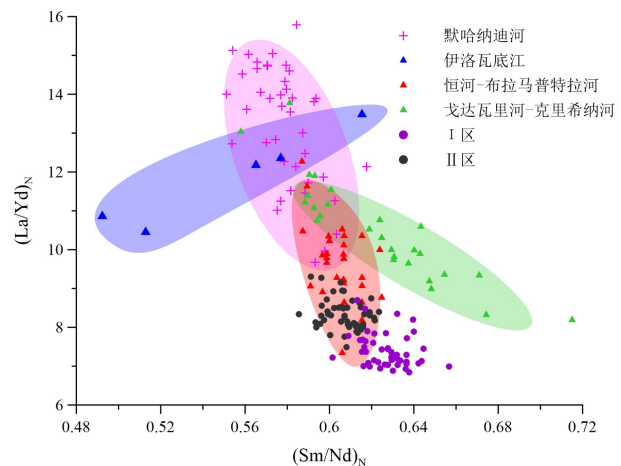


图8 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 物源识别图

Fig.8 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ provenance identification diagram

孟加拉湾沉积物的产量及输运受季风影响显著,在西南季风期间雨水充沛,恒河-布拉马普特拉河入海物质通量在此期间达到峰值[9,53-54],沉积物搬运量占全年总量的95%[55],大量的悬浮颗粒随河流冲淡水向南输送[56],并在夏季顺时针的环流作用下在湾内扩散、沉降,而由于恒河-布拉马普特拉河极高入海物质通量,这也成为下扇区陆源物质的主要来源。

印度大陆一侧的陆坡区海底峡谷发育较小,并无大型海底峡谷输运印度物质对孟加拉扇进行物质供应,向研究区的物质输送主要依靠表层环流的搬运。模型研究的结果显示,由戈达瓦里河-克里希

纳河搬运的印度半岛物质可以在东印度沿岸流的作用下向深海搬运^[57]。从孟加拉湾表层环流特征及戈达瓦里河-克里希纳河与研究区的相对位置来看,印度源区物质向研究区的输运主要依靠东北季风流。在东北季风期间,东印度沿岸流沿着印度东部向南流动^[6],形成一低盐度的羽状流^[58],携带来自印度半岛的物质向南搬运,并与此时孟加拉湾内的逆时针环流的共同作用下向下扇区输送沉积物并对研究区西侧I区沉积物产生影响。

5 结论

(1)研究区表层沉积物稀土元素总含量的平均值为100.85 $\mu\text{g/g}$,经球粒陨石标准化后稀土元素有明显的Eu负异常而无明显的Ce异常的特点,配分模式整体显示出轻稀土含量明显富集、重稀土含量相对均一的特征。

(2)研究区表层沉积物稀土元素具有明显的陆源属性,其主要来源为陆源物质,而受风化剥蚀与河流输运过程、自生铁锰氧化物和氢氧化物、重矿物、自生碳酸盐和沉积物粒度等的影响较小。基于稀土元素主要参数可以将研究区分为两个区:西部的I区和东部的II区。

(3)基于稀土元素 $(\text{La/Yb})_N-(\text{Sm/Nd})_N$ 物源识别图的分析结果,研究区表层沉积物的最主要来源为恒河-布拉马普特拉河搬运的喜马拉雅山侵蚀物质,其对整个研究区均有重要影响;次要来源为戈达瓦里河-克里希纳河输送的印度半岛物质,其主要影响范围为研究区西侧的I区。两大源区沉积物向研究区的搬运主要依靠表层环流。

致谢:感谢M.V.SEADEC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朱爱美、高晶晶、崔菁菁协助进行了稀土元素测试,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [2] 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.]
- [3] Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. Marine & Petroleum Geology, 2002, 19(10): 1191-1223.
- [4] Curray J R, Moore D G. Growth of the Bengal deep-sea fan and denudation in the Himalayas [J]. Geological Society of America Bulletin, 1971, 82(3): 563-572.
- [5] Kolla V, Moore D G, Curray J R. Recent bottom-current activity in the deep western Bay of Bengal [J]. Marine Geology, 1976, 21(4): 255-270.
- [6] Schott F A, McCreary J P Jr. The monsoon circulation of the Indian Ocean [J]. Progress in Oceanography, 2001, 51(1): 1-123.
- [7] Joussain R, Colin C, Liu Z F, et al. Climatic control of sediment transport from the Himalayas to the proximal NE Bengal Fan during the last glacial-interglacial cycle [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 148: 1-16.
- [8] Xue P F, Chang L, Wang S S, et al. Magnetic mineral tracing of sediment provenance in the central Bengal Fan [J]. Marine Geology, 2019, 415: 105955.
- [9] Tripathy G R, Singh S K, Ramaswamy V. Major and trace element geochemistry of Bay of Bengal sediments: Implications to provenances and their controlling factors [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 397: 20-30.
- [10] 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.
- [11] Iyer S D, Gupta S M, Charan S N, et al. Volcanogenic-hydrothermal iron-rich materials from the southern part of the Central Indian Ocean Basin [J]. Marine Geology, 1999, 158(1-4): 15-25.
- [12] Weber M E, Wiedicke-Hombach M, Kudrass H R, et al. Bengal Fan sediment transport activity and response to climate forcing inferred from sediment physical properties [J]. Sedimentary Geology, 2003, 155(3-4): 361-381.
- [13] Emmel F J, Curray J R. The Bengal Submarine Fan, Northeastern Indian ocean [J]. Geo-Marine Letters, 1983, 3(2-4): 119-124.
- [14] Galy V, François L, France-Lanord C, et al. C4 plants decline in the Himalayan basin since the Last Glacial Maximum [J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(13-14): 1396-1409.
- [15] Babu C P, Pattan J N, Dutta K, et al. Shift in detrital sedimentation in the eastern Bay of Bengal during the late Quaternary [J]. Journal of Earth System Science, 2010, 119(3): 285-295.
- [16] Kessarkar P M, Rao V P, Ahmad S M, et al. Changing sedimentary environment during the Late Quaternary: Sedimentological and isotopic evidence from the distal Bengal Fan [J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2005, 52(9): 1591-1615.
- [17] Tripathy G R, Singh S K, Bhushan R, et al. Sr-Nd isotope composition of the Bay of Bengal sediments: Impact of climate on erosion in the Himalaya [J]. Geochemical Journal, 2011, 45(3): 175-186.
- [18] 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.]

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 袁衍光, 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, 41 (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, 41 (2): 147-157.]
- [24] Wang S H, Zhang N, Chen H, et al. The surface sediment types and their rare earth element characteristics from the continental shelf of the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 88: 185-202.
- [25] Sun X Q, Liu S F, Li J R, et al. Major and trace element compositions of surface sediments from the lower Bengal Fan: implications for provenance discrimination and sedimentary environment [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 184: 104000.
- [26] McManus J, Berelson W M, Klinkhammer G P, et al. Geochemistry of barium in marine sediments: Implications for its use as a paleoproxy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 (21-22): 3453-3473.
- [27] 沈华梯. 深海沉积物中的稀土元素[J]. *地球化学*, 1990 (4): 340-348. [SHEN Huati. Rare earth elements in deep-sea sediments [J]. *Geochimica*, 1990 (4): 340-348.]
- [28] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33 (2): 241-265.
- [29] 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.
- [30] 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 & Petroleum Geology*, 2015, 60: 18-33.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 刘娜, 孟宪伟. 冲绳海槽中段表层沉积物中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*, 2004, 24 (4): 37-43. [LIU Na, MENG Xianwei. Characteristics of rare earth elements in surface sediments from the middle Okinawa trough: implications for provenance of mixed sediments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24 (4): 37-43.]
- [34] 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.
- [35] Yang S Y, Jung H S, Choi M S, et al. 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.
- [36] Condie K C, Dengate J, Culler R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (2): 279-294.
- [37] Sharma A, Rajamani V. Major element, REE, and other trace element behavior in amphibolite weathering under semiarid conditions in Southern India [J]. *Journal of Geology*, 2000, 108 (4): 487-496.
- [38] Cullen J L. Microfossil evidence for changing salinity patterns in the Bay of Bengal over the last 20000 years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 35: 315-356.
- [39] 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.]
- [40] 刘升发, 石学法, 王昆山, 等. 全球变化与海气相互作用专项(GASI-IND-CJ03)研究报告[R]. 自然资源部第一海洋研究所, 2019. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. The Research Report of National Survey Project of China (GASI-IND-CJ03)[R]. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China, 2019.]
- [41] Holser W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 132 (1-4): 309-323.
- [42] Li J R, Liu S F, Feng X L, et al. Major and trace element geochemistry of the mid-Bay of Bengal surface sediments: implications for provenance [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36 (3): 82-90.
- [43] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Clay minerals and Sr-Nd isotopic composition of the Bay of Bengal sediments: Implications for sediment provenance and climate control since 40 ka [J]. *Quaternary International*, 2018, 493: 50-58.
- [44] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Distributions of clay minerals in surface sediments of the middle Bay of Bengal: source and transport pattern [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 145: 59-67.
- [45] Hein C J, Galy V, Galy A, et al. Post-glacial climate forcing of surface processes in the Ganges-Brahmaputra river basin and implications for carbon sequestration [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 478: 89-101.
- [46] Kuehl S A, Hariu T M, Moore W S. Shelf sedimentation off the Ganges-Brahmaputra river system: evidence for sediment bypassing to the Bengal fan [J]. *Geology*, 1989, 17 (12): 1132-1135.
- [47] Weber M E, Wiedicke M H, Kudrass H R, et al. Active growth of the

- Bengal Fan during sea-level rise and highstand [J]. *Geology*, 1997, 25(4): 315-318.
- [48] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Sedimentary responses to the sea level and Indian summer monsoon changes in the central Bay of Bengal since 40 ka [J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105947.
- [49] Weber M E, Lantzsich H, Dekens P, et al. 200, 000 years of monsoonal history recorded on the lower Bengal Fan - strong response to insolation forcing [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 166: 107-119.
- [50] 方念乔, 陈萍, 吴琳, 等. 孟加拉湾深海记录中的等深流活动特征及其环境意义初探[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 570-575. [FANG Nianqiao, CHEN Ping, WU Lin, et al. Contour currents in deep-water records from Bay of Bengal and its environmental implication [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 570-575.]
- [51] Zhu L P, Lü X M, Wang J B, et al. Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13318.
- [52] Fontugne M R, Duplessy J C. Variations of the monsoon regime during the upper quaternary: Evidence from carbon isotopic record of organic matter in North Indian Ocean sediment cores [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 56(1-2): 69-88.
- [53] Goodbred S L. Response of the Ganges dispersal system to climate change: A source-to-sink view since the last interstade [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1-2): 83-104.
- [54] Mergulhao L P, Guptha M V S, Unger D, et al. Seasonality and variability of coccolithophore fluxes in response to diverse oceanographic regimes in the Bay of Bengal: Sediment trap results [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 371: 119-135.
- [55] Singh M, Singh I B, Müller G. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River [J]. *Geomorphology*, 2007, 86(1-2): 144-175.
- [56] Akhil V P, Lengaigne M, Vialard J, et al. A modeling study of processes controlling the Bay of Bengal sea surface salinity interannual variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(12): 8471-8495.
- [57] Jana S, Gangopadhyay A, Lermusiaux P F J, et al. Sensitivity of the Bay of Bengal upper ocean to different winds and river input conditions [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 187: 206-222.
- [58] Shetye S R, Gouveia A D, Shankar D, et al. Hydrography and circulation in the western Bay of Bengal during the northeast monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C6): 14011-14025.