



渤海海峡表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别

赵竺栩，熊伟，王忠蕾，黄龙，密蓓蓓，王峻，梅西

Distribution and origination of rare earth elements in surface sediments of the Bohai Strait

ZHAO Zhuxu, XIONG Wei, WANG Zhonglei, HUANG Long, MI Beibei, WANG Jun, and MEI Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024072501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海表层沉积物稀土元素分布特征及其物源指示意义

Distribution of rare earth elements in surface sediments of the South Yellow Sea and its implication to sediment provenances
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 93–103

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

Rare earth element composition of the surface sediments from the south Bay of Bengal and its implications for provenance
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 80–89

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

Rare earth element composition of the surface sediments from the Ninetyeast Ridge and its implications for provenance
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 92–100

冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示

Characteristics of rare earth elements in the sediment cores from the Okinawa Trough and their implications for sediment provenance
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 69–82

马里亚纳“沟盆”深水沉积环境稀土元素特征与物源约束

Characteristics of rare earth elements in deep-water sediments in Mariana “Trench–Basin” system and their provenance constraints
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 102–114

南黄海中部MIS6期以来沉积物稀土元素组成及其物源指示意义

Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 92–105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵竺栩, 熊伟, 王忠蕾, 等. 渤海海峡表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 151-160.
ZHAO Zhuxu, XIONG Wei, WANG Zhonglei, et al. Distribution and origination of rare earth elements in surface sediments of the Bohai Strait[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 151-160.

渤海海峡表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别

赵竺栩^{1,2}, 熊伟^{2,3}, 王忠蕾², 黄龙², 密蓓蓓², 王峻¹, 梅西^{1,2}

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海洋与地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 对渤海海峡 383 个站位表层沉积物的稀土元素进行了系统分析, 旨在揭示其分布特征、影响因素、主要物质来源以及迁移机制。结果表明: 渤海海峡沉积物稀土元素总量 (Σ REE) 为 44.85~283.00 $\mu\text{g/g}$, 平均含量为 166.33 $\mu\text{g/g}$, 高值区主要分布在沉积物粒度较细的西部和南部海域, 低值区分布在沉积物粒度较粗的东北部海域, 呈轻稀土富集、重稀土亏损的特点。通过对 Σ REE 以及部分特征参数与粒度、化学蚀变指数和部分元素进行相关性分析, 发现 Σ REE 与沉积物粒度平均粒径呈正相关, 指示研究区稀土分布与沉积物粒度和物源密切相关。渤海海峡稀土元素的上地壳和球粒陨石配分模式与黄河及辽东湾河流物质具有相似性, 表现出较强的陆源性特征, 而与鸭绿江和朝鲜半岛河流差异较大, 表明物源主要来自中国大陆。利用球粒陨石标准化计算的 $\delta\text{Eu-(La/Yb)}_N$ 和 $(\text{Gd/Yb})_N\text{-(La/Yb)}_N$ 指标进行物源判别, 结果显示渤海海峡物质主要来源于黄河, 而研究区东北部则为黄河与辽东湾河流混合来源。辽东湾环流及渤海沿岸流的共同作用影响了渤海海峡的沉积格局。

关键词: 表层沉积物; 稀土元素; 物源; 渤海海峡

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024072501](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024072501)

Distribution and origination of rare earth elements in surface sediments of the Bohai Strait

ZHAO Zhuxu^{1,2}, XIONG Wei^{2,3}, WANG Zhonglei², HUANG Long², MI Beibei², WANG Jun¹, MEI Xi^{1,2}

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

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

Abstract: To understand the material exchange between the Yellow Sea and the Bohai Sea, the distribution and origination of rare earth elements (REE) in surface sediments from 383 stations in the Bohai Strait were studied, the influencing factors, main sources of materials, and migration mechanisms of the REE were analyzed systematically. Results indicate that the total REE content (Σ REE) in the sediments of the Bohai Strait ranges from 44.85 to 283.00 $\mu\text{g/g}$, on average of 166.33 $\mu\text{g/g}$. The high-value areas were distributed in mainly the western and southern sea areas with finer sediments, while the low-value areas were located in the northeastern sea areas with coarser sediments, showing characteristics of light REE enrichment and heavy REE depletion. Correlation analysis between Σ REE and certain characteristic parameters to grain size, chemical index of alteration (CIA), and some elements, we found that Σ REE is positively correlated with sediment mean grain size, indicating a close relationship between REE distribution and sediment grain size / provenance. The distribution patterns of REEs in the upper continental crust and chondritic meteorites in the Bohai Strait show similarities with the material carried by the Huanghe (Yellow) River and rivers surrounding the Liaodong Bay, indicating a distinct terrigenous imprint of riverine materials. In contrast, there are significant differences with the Yalu River and rivers in the Korean Peninsula, indicating that the primary source of the material is from the Chinese mainland. Using the standardized calculation of $\delta\text{Eu-(La/Yb)}_N$ and $(\text{Gd/Yb})_N\text{-(La/Yb)}_N$ indices based on chondritic meteorites, source discrimination was conducted. The results indicate that the material in the Bohai Strait mainly originates from the Huanghe River, while in the northeastern sea areas of the Bohai Strait, it is a mixture of the Huanghe River and rivers surrounding the Liaodong Bay. The combined effect of Liaodong Bay circulation and Bohai Sea coastal current affects the sedimentary patterns in the Bohai Strait.

Key words: surface sediment; rare earth elements; provenance; Bohai Strait

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20221710)

作者简介: 赵竺栩(1997—), 女, 硕士研究生, 海洋地球化学专业, E-mail: 1823500178@qq.com

通讯作者: 熊伟(1996—), 男, 博士研究生, 从事海洋地质研究, E-mail: 807181333@qq.com

梅西(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地球化学研究, E-mail: meixi12345@163.com

收稿日期: 2024-07-25; 改回日期: 2024-08-26. 周立君编辑

沉积物的成因及其物质来源是近代海洋沉积学研究的核心议题之一。稀土元素(REE)的物理化学性质在表生环境中相对稳定,其丰度信息、分配模式及异常参数等受沉积物的风化、侵蚀、搬运和沉积过程的影响较小^[1-3],因此被视为追踪沉积物来源的有效指标^[4]。黄海和渤海是中国东部边缘海的一部分,每年从中国大陆和朝鲜半岛接纳大量由河流携带入海的陆源物质^[5]。前人研究表明,黄海和渤海海域的地球化学元素分布格局受沉积物粒度的影响^[6-7],黄河是渤海海域最重要的物质来源,但其沉积物多集中于黄河口地区^[8],而其余部分主要向南部和东部扩散^[9-10],因此莱州湾、渤海湾、渤海海峡地区的物源多受黄河或沿岸河流影响^[7,11-16],而辽东湾地区则主要受辽河、滦河、大凌河、小凌河等河流影响^[17]。黄海表层沉积物的物源则较为复杂,既有来自鸭绿江和朝鲜半岛的河流输入^[13,18-19],又有来自黄河、长江及山东半岛近岸河流输入^[12-13]。密密密等对南黄海表层沉积物稀土元素的研究表明,研究区存在中国大陆和朝鲜半岛两个主要物源区^[20]。渤海海峡位于北黄海和渤海交汇处,受渤海环流、山东半岛沿岸流和黄海暖流的影响,水动力条件复杂^[21],识别该区域的沉积物物源对于深入揭示黄渤海沉积物的源汇过程有重要意义。然而对于渤海海峡的物源研究还存在争议,有学者认为渤海海峡物源主要来自北黄海东部的鸭绿江^[22],也有研究认为物源主要来自于黄河和辽河,特别是辽河沉积物会在渤海湾环流作用的驱动下,向南迁移至渤海海峡沉积下来^[23]。蓝先洪等认为渤海东部区域受渤海东岸东部环流和沿岸流的影响,其沉积物主要来自辽河、复州河及老铁山水道的侵蚀物质^[13]。值得注意的是,前人研究多集中在渤海海峡庙岛群岛西南部,且研究点位较为分散稀疏。

为全面厘清渤海海峡地区的稀土元素分布特征及物质来源,本研究对渤海海峡进行了高分辨率的采样,通过对 383 个站点的表层沉积物的稀土元素进行系统分析,并与黄渤海周边河流沉积物进行对比研究,探讨了渤海海峡表层沉积物稀土元素组成特征、分布规律及物质来源,并结合流系格局推断其控制机制。

1 地质概况

渤海为半封闭的陆架边缘海,包含辽东湾、渤海湾、莱州湾、渤海中央盆地以及渤海海峡,平均水深 18 m^[24]。黄河、大凌河、滦河、辽河、海河等

大型河流从周边海湾汇入。其中黄河作为我国第二大河,年输沙量为 1.1×10^9 t^[25]。渤海海底地形从三大海湾向中央海盆倾斜,起伏平缓,坡度较小^[26]。黄海暖流 12 月份在北纬 37°附近分流^[27],经老铁山水道西进至渤海西岸后一分为二,北支沿辽东湾两岸北上,与辽东湾低盐沿岸流形成辽东湾环流;南支汇入莱州湾,经渤海海峡流入北黄海,形成一个逆时针方向的环流^[28]。渤海海峡位于山东半岛和辽东半岛之间,受断裂构造和潮流侵蚀的影响,渤海海峡南部为一系列主要由上元古界浅变质基底(蓬莱群,以石英岩、板岩夹为主,厚度较大)组成的地形凸起(包括 32 个岛屿、66 个明礁、16 个暗礁、2 处长滩)构成北东走向零星分布的庙岛群岛,北部为老铁山水道^[26]。黄海暖流通过渤海海峡北部进入渤海,与渤海沿岸流组成弱循环(冬季和夏季循环方向相反,图 1),最终从渤海海峡南部流出^[22]。渤海海峡南部表层沉积物以大范围的粉砂质砂为主,北部以含砾沉积物为主,呈北粗南细的特征^[29]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

研究区在渤海海峡($38^{\circ}\text{--}38.7^{\circ}\text{N}$ 、 $120.3^{\circ}\text{--}121.3^{\circ}\text{E}$),水深为 10~70 m。本次研究的所有样品来自青岛海洋地质研究所 2019 年和 2022 年海洋区域地质调查项目 2 个航次的 383 个站位(图 1),采用箱式取样的方式获取。每个样品选取表层 0~5 cm 进行采集和保存。

2.2 分析测试

所有样品在恒温(40°C)下冷冻干燥,并研磨至 200 目以下。随后对样品使用马弗炉进行高温灼烧,再使用 50% 的 HNO_3 溶样后移液定容,最后采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪测定了 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等 10 种常量成分。使用电感耦合等离子体质谱分析(ICP-MS)方法测定了 Co、Cr、Th、Zr、Rb、Sr 等 10 种微量元素以及 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Lu、Er、Tm、Yb 等稀土元素的含量。测试过程中依照国家一级标准物质对样品进行质量监控,另选取 10% 重复样监测精确度,确保每个稀土元素含量的相对偏差小于 5%。

样品的粒度测试分析采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行。在样品预处理过程中,

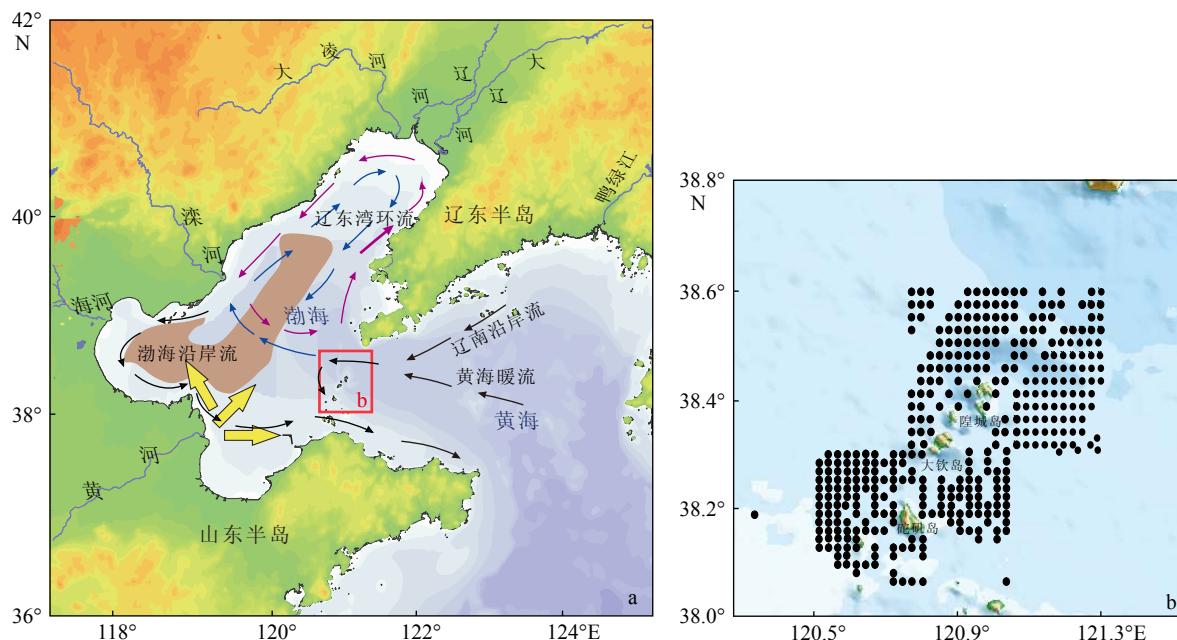


图 1 研究区地理位置 (a) 及取样站位分布 (b)

a 图中棕色区域表示渤海泥质区, 黄色箭头代表黄河物质扩散方向, 黑色箭头代表全年海流流向, 紫色箭头代表夏季环流方向, 蓝色箭头代表冬季环流方向, 环流改绘自文献 [24]; b 图中黑色圆点代表研究区站位。

Fig.1 Geographic location of the study area (a) and the distribution of sampling points (b)

The brown block indicates the muddy zone of the Bohai Sea, the yellow arrow represents the direction of diffusion of the Yellow River material, the black arrow represents the direction of year-round current flow, the purple arrow represents the direction of the summer circulation, the blue arrow represents the direction of the winter circulation, the circulation is from reference [24], and the black dots represent the stations in the study area.

依次加入 15 mL 10% 的 H_2O_2 和 15 mL 10% 的 HCl, 静置 24 h 以去除有机质和碳酸盐组分。随后使用 5.1% 的六偏磷酸钠溶液进行分散处理。测量范围为 0.02~2000 μm , 测量误差在 3% 以内。

所有样品的测试均在中国地质调查局青岛海洋地质研究所完成。

3 结果

3.1 稀土元素分布特征

表 1 展示了表层沉积物中稀土元素的含量及其特征参数。结果显示, 渤海海峡稀土元素总量 (ΣREE) 为 44.85~283 $\mu\text{g/g}$, 存在明显波动, 平均值为 166.33 $\mu\text{g/g}$ (图 2a、表 1), 这一数值接近黄河 (159.86 $\mu\text{g/g}$)^[30], 高于深海沉积物 (125.13 $\mu\text{g/g}$)^[31], 表现出明显的陆架区域特征, 同时, 这一数值又低于渤海西部沉积物 (188.12 $\mu\text{g/g}$)^[32] 和渤海中部沉积物 (179.67 $\mu\text{g/g}$)^[13], 表明在渤海范围内, 稀土元素总量呈现出自西向东逐渐减少的趋势。以南、北隍城岛为中心, ΣREE 高值区主要分布在研究区西部和南部海域, 而低值区分布在研究区东北部海域。结

合沉积物平均粒径分布 (图 2e) 来看, 二者分布趋势有较好的一致性, 即沉积物颗粒越细, 稀土元素的总量越富集。

渤海海峡表层沉积物轻稀土元素 (LREE) 的含量变化范围为 33.8~232.20 $\mu\text{g/g}$, 平均为 130.91 $\mu\text{g/g}$ (表 1), 显示出较高的富集程度, 约占总稀土含量的 78.7%。相比之下, 重稀土元素 (HREE) 的丰度较低 (11.05~56.82 $\mu\text{g/g}$), 平均仅为 35.43 $\mu\text{g/g}$ (表 1), 约占总稀土含量的 21.3%, 因此研究区沉积物的 LREE/HREE 比值较高, 变化范围为 2.58~5.17, 平均值为 3.71 (图 2b、表 1), 呈轻稀土明显富集、重稀土明显亏损的特点, 表现出强陆源物源指示性^[33]。 $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 整体变化比较均匀 (图 2b), 高值出现在研究区东北部及中东部小范围区域, 分别对应 ΣREE 的低值和高值。

δEu 与 δCe 是稀土元素地球化学特征的两个重要参数, 能够反映 Eu 和 Ce 元素相对于其他稀土元素的分离程度, 是可以灵敏反映稀土元素特征的重要参数。结果显示, 样品中 δEu 变化范围为 0.52~0.80, 平均值为 0.67, 标准偏差为 0.05 (图 2c、表 1), 显示中等程度的 Eu 负异常, 表明沉积物在搬运途中受到的后期改造作用较轻^[20]; δEu 分布不均匀, 且

表1 渤海海峡表层沉积物稀土元素含量(μg/g)与特征参数

Table 1 Rare earth element content (μg/g) and characteristic parameters of surface sediments in the Bohai Strait

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
平均值	30.90	59.99	7.14	26.99	4.90	0.99	4.34	0.66	3.78	0.76	2.18	0.34	2.21	0.35	20.81
ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE			(La/Yb) _N		(Gd/Yb) _N		δEu		δCe			
最大值	54.1	108	12.7	47.5	8.59	1.34	7.18	1.07	6.09	1.22	3.6	0.59	3.92	0.62	33.8
最小值	6.47	15.1	1.89	8.18	1.84	0.32	1.45	0.21	1.19	0.24	0.68	0.11	0.76	0.12	6.29
标准偏差	6.54	13.06	1.43	5.55	1.03	0.16	0.92	0.14	0.83	0.16	0.51	0.08	0.51	0.08	4.31
平均值	166.33		130.91		35.43		3.71		141.05		23.68		0.67		0.97
最大值	283.00		232.20		56.82		5.17		236.13		31.62		0.80		1.04
最小值	44.85		33.80		11.05		2.58		85.13		18.81		0.52		0.86
标准偏差	34.72		27.67		7.47		0.29		13.01		1.54		0.05		0.02

与ΣREE分布呈明显的相反趋势,即ΣREE含量高的地区δEu值较低。δCe变化范围为0.86~1.04,平均值为0.97,标准偏差为0.02(图2d、表1),未见明显的Ce异常。δCe高值出现在砣矶岛附近海域,低值出现在北隍城岛附近海域以及研究区东北部区域。

3.2 稀土元素的配分模式

为了解稀土元素的配分模式,一般需要对稀土元素原始数据进行标准化处理,常用的方法有两种:一是以北美页岩(NASC)或上地壳(UCC)为标准,揭示不同稀土元素之间的分异程度;二是以球粒陨石为标准,反映样品相对地球原始物质的分异程度,消除稀土元素奇偶效应^[34-35]。为准确揭示渤海海峡稀土元素的配分模式,本文分别采用了UCC和球粒陨石对稀土元素进行标准化处理,球粒陨石和上陆壳数据引自Taylor等^[35]。

沉积物稀土元素的不同配分模式主要受物源的影响,可以揭示沉积物的物质来源和物源区特征等^[36]。渤海海峡与周边入海河流稀土元素的球粒陨石分布模式基本一致(图3a),皆呈轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型,但锦江、汉江和鸭绿江以及复州河和滦河的轻稀土曲线较研究区走势更陡,即轻稀土相对于重稀土富集更为明显,而黄河轻重稀土分异趋势则较渤海海峡稍缓。各区域在Eu元素处均出现“V”形下凹趋势,显示出中等程度的Eu负异常,Ce异常不明显。总体而言,渤海海峡与周边入海河流相对地球原始物质的分异程度相同。

在UCC分布模式下,渤海海峡与周边主要入海河流整体上有所区别(图3b),Eu异常不明显,鸭绿

江、复州河、滦河以及朝鲜半岛河流汉江和锦江的轻稀土更为富集,轻重稀土分异相对明显,表现为右倾型配分模式;而渤海海峡与辽东湾河流具有相似分布模式,元素分异不明显,表现为平缓型配分模式与较弱的Ce负异常。

4 讨论

4.1 渤海海峡稀土元素的制约因素

沉积物中的稀土元素主要受源区母岩(物源)、沉积物粒度、矿物组成、化学风化以及人类活动等因素的影响^[40],其中物质来源是控制海域沉积物稀土元素含量的首要因素^[20]。陆源碎屑是中国东部陆架海表层沉积物的主要组成部分^[39],因此在利用稀土元素对渤海海峡进行物源示踪时,周边的大陆河流是需要考虑的重要影响因素。渤海为半封闭的陆架边缘海,主要入海河流有北部的辽河、六股河、小凌河、双台子河、滦河和复州河等辽东湾河流以及西部的黄河^[25]。渤海海峡稀土元素含量低于渤海西部和中部^[13,32],呈现离大型河流越远含量越低的趋势。渤海海峡稀土元素的配分模式与黄海以及辽河等辽东湾河流相似,指示了明显的陆源性,且稀土元素在靠近黄河和辽东湾河流的西部区域富集,而在缺乏大型入海河流的东北部地区则含量较少(图2a)。因此,渤海海峡表层沉积物稀土元素总量明显受到物源控制。

粒度被认为是影响稀土元素含量的重要控制因素^[41]。稀土元素通常以类质同象的方式贮存在黏土矿物中,因此,黏土粒级的沉积物通常具有更

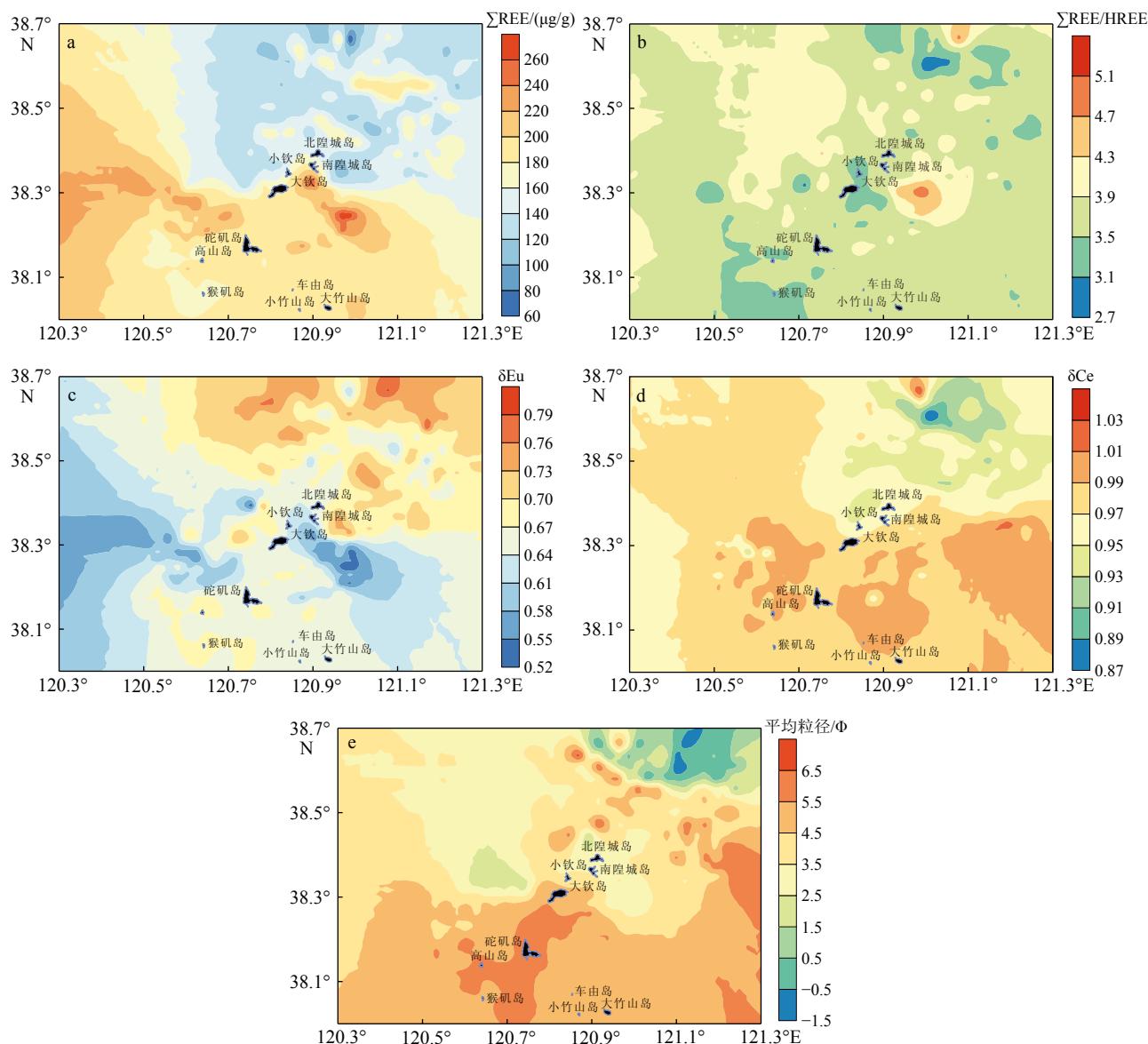


图 2 研究区表层沉积物 REE 特征参数

Fig.2 The distribution of characteristic parameters of rare earth elements in the surface sediments

高的稀土元素含量^[42], 这一现象在前人研究中普遍存在^[13,20,32,34]。研究结果显示, 渤海海峡稀土元素含量与粒度分布趋势有明显的对应关系, 即沉积物颗粒越细, 稀土元素越富集(图 2a、e), 通过对渤海海峡表层沉积物稀土元素含量与平均粒径之间的相关性进行统计分析(图 4a), 发现ΣREE 与 Mz 呈正相关关系($R^2=0.252$), 说明粒度对研究区沉积物中ΣREE 的分布有影响。

化学蚀变指数(CIA)主要衡量因化学、物理、生物的风化作用导致的稀土元素迁移, 并在沉积过程中发生富集的程度^[40], 其计算方法为:

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

式中, CaO*指岩石硅酸岩中的 CaO, McLennan^[42]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 $\text{CaO}^* = \text{CaO}'$; 相反地, 若计算后 $\text{CaO}' > \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$ 。结果显示, 渤海海峡表层沉积物 CIA 值为 28.48~69.25, 平均值为 53.26。为了进一步分析 CIA 对稀土元素的影响, 本文对ΣREE 和 CIA 值进行了相关性分析(图 4b), 结果显示ΣREE 与 CIA 之间没有明显的相关性($R^2=0.115$), 与前人研究结果一致^[13,32]。渤海海峡周边河流, 如黄河、鸭绿江、辽河等辽东湾河流地处北方干旱寒冷地带, 其沉积物化学风化程度较弱^[20], 因此化学风化对渤海海峡稀土元素的分布影响不大。

根据前人研究, 稀土元素的组成也会受自生铁锰氧化物的影响^[43]。图 4 显示, 沉积物中铁的含量与陆生元素如铝和钛呈现出较高相关性($R^2=0.48$,

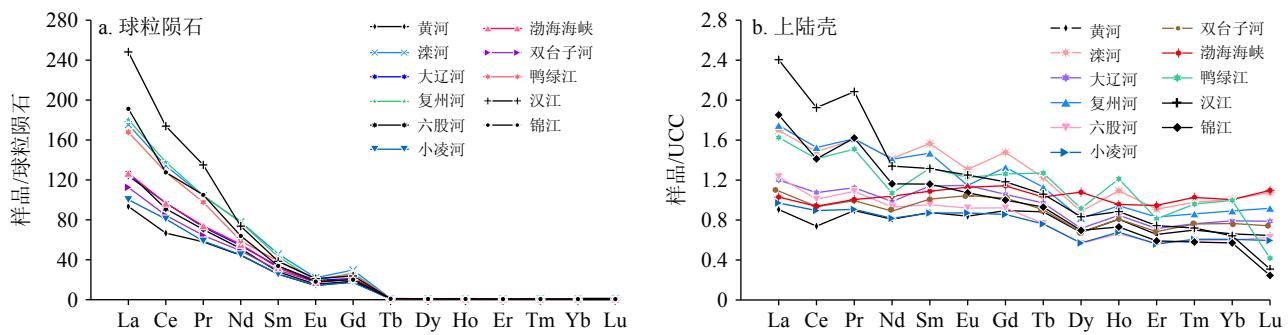


图3 渤海海峡及河流沉积物稀土元素平均值与球粒陨石(a)和上陆壳(UCC)(b)标准化配分曲线

辽东湾河流数据引自张现荣等^[37], 黄河引自杨守业等^[38], 鸭绿江引自严杰等^[39], 汉江、锦江河流引自赵一阳等^[33]。

Fig.3 The chondrite-normalized (a) and UCC-normalized (b) patterns of the REE in the surface sediments from the Bohai Strait and rivers

The data of Liaodong Bay rivers are from Zhang Xianrong et al.^[37], Yellow River from Yang Shouye et al.^[38], Yalu River from Yan Jie et al.^[39], The Han River and the Keum River data are from Zhao Yiyang et al.^[33]

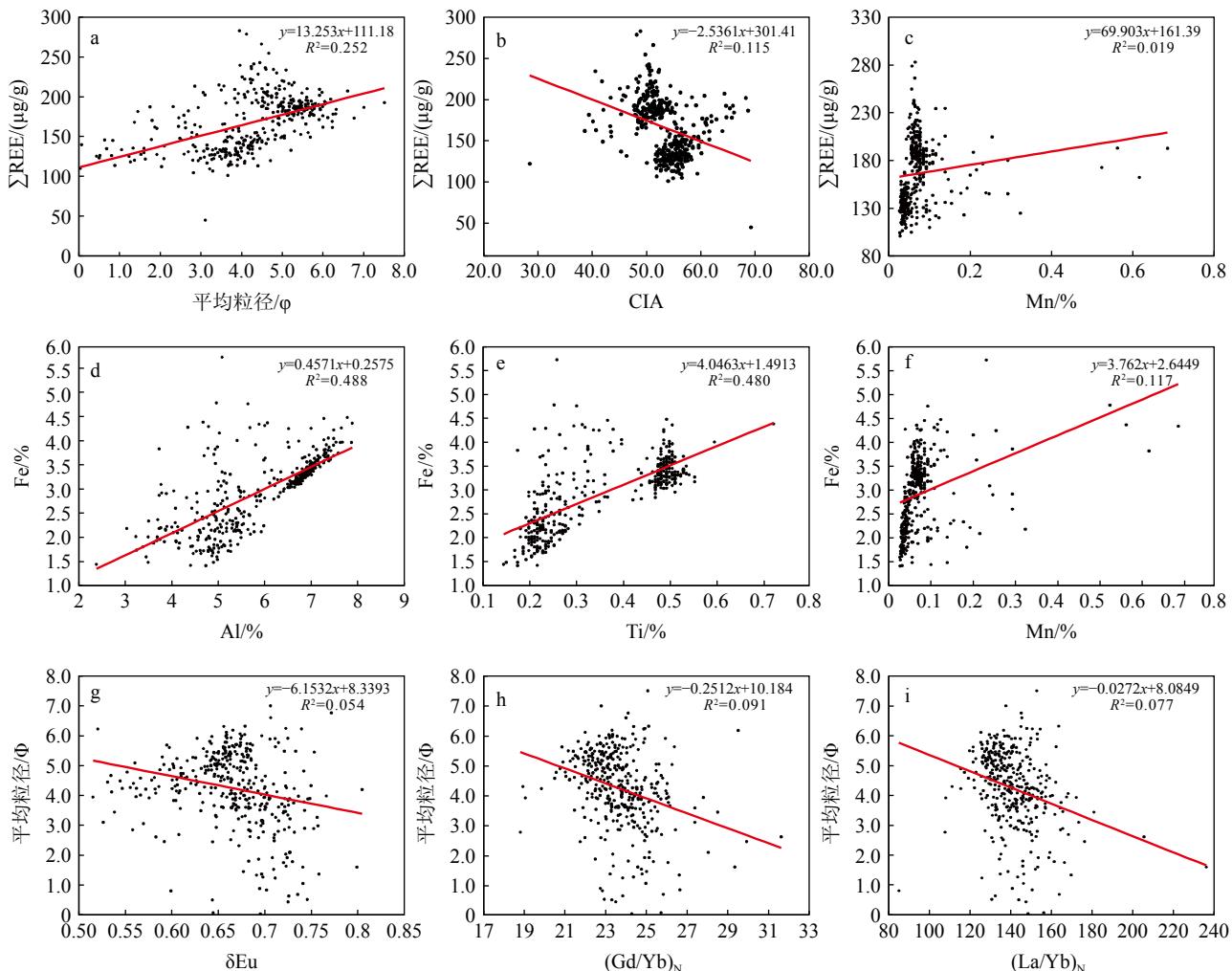


图4 表层沉积物样品中平均粒径、CIA、 ΣREE 、Fe、Al、Ti、Mn、 δEu 、 $(\text{Gd/Yb})_N$ 以及 $(\text{La/Yb})_N$ 之间的相关性

Fig.4 Correlation among Mz, CIA, ΣREE , Fe, Al, Ti, Mn, δEu , $(\text{Gd/Yb})_N$ and $(\text{La/Yb})_N$ for the surface sediment samples

图4d、e), 表明研究区 Fe 主要为陆源。沉积物中 Fe 和 Mn 没有明显相关性($R^2=0.1171$), 表明沉积物中 Fe 和 Mn 之间缺乏同源性(图4f), 沉积物中自生铁锰氧化物含量可以忽略, 且 ΣREE 和 Mn 之间

也无明显相关性($R^2=0.0196$, 图4c), 因此可以忽略沉积物中自生铁锰氧化物的影响。此外, 渤海海峡沉积物中的 ΣREE 和 Mn 含量之间也无明显相关性($R^2=0.0196$, 图4c), 表明自生铁锰氧化物不会影响

研究区的稀土元素组成和分布特征, 这与邻近山东半岛地区的研究结果一致^[44]。

此外, 重矿物也是影响稀土元素含量的重要因素^[33]。渤海海峡表层沉积物 Σ REE 与 Ti、Zr、Th 之间存在明显的正相关关系(表 2)。Zr、Ti、Th 元素的离子半径和电负性等化学参数与稀土元素非常相似, 因此, 经常与稀土元素一起共生或相互替代, 并存在于锆石、榍石、磷灰石等重矿物中^[33,45]。然而渤海海峡表层沉积物重矿物含量较低(<5%)^[46], 且主要来自于辽东半岛沿岸与庙岛群岛的冲刷侵蚀, 而非周边大陆河流输送, 其中锆石、榍石、磷灰石等矿物在重矿物中占比不足 2%(宁泽, 未发表数据)。因此, 重矿物对渤海海峡稀土元素含量影响是有限的。

4.2 物质来源判别

渤海作为我国的半封闭内海, 直接接收大量的黄河泥沙, 并与黄海进行物质交换。渤海的沉积物主要由黄河泥沙向西部、东部和南部迁移, 进入渤海湾、渤海东部和渤海南部^[25]。已有研究表明, 陆源碎屑是中国东部陆架海表层沉积物的主要组成部分^[39]。在渤海, 黄河与辽东湾河流提供了巨大的输沙量^[25], 这些沉积物及其扩散方向对渤海的沉积特征具有显著影响, 同时扩散方向受水动力因素的影响较大^[47]。从稀土元素的配分模式来看, 渤海海峡与周边入海河流, 如黄河以及辽河等辽东湾河流相似, 表现出明显的陆源性特征^[7,13,20], 而鸭绿江以及朝鲜半岛河流锦江和汉江的稀土元素在球粒陨石配分模式下曲线较为陡峭, 轻稀土元素相对于重

稀土元素的富集更为明显, 显示出与渤海海峡的显著差异(图 3a、b)。这表明, 渤海海峡地区主要物源为中国大陆, 而受朝鲜半岛物质影响较小。

众多研究表明, 稀土元素参数判别图 δ Eu-(La/Yb)_N 和 (Gd/Yb)_N-(La/Yb)_N 可作为有效指标, 用于区分不同来源的沉积物^[20,48]。渤海海峡沉积物稀土元素含量受粒度影响明显, 本文以 δ Eu、(Gd/Yb)_N 和 (La/Yb)_N 三个不受粒度影响的指标用于追踪渤海海峡的沉积物来源(图 4g-i)。通过对比渤海海峡表层沉积物的稀土元素与周边主要入海河流沉积物的稀土元素数据, 发现渤海海峡主要覆盖了黄河及部分辽东湾河流数据值的范围, 这指示了渤海海峡的多物源特征, 而渤海海峡不同区域的稀土元素指标的差异则进一步表明稀土元素存在明显的分馏差异, 验证了 δ Eu-(La/Yb)_N 和 (Gd/Yb)_N-(La/Yb)_N 指标的可靠性。根据渤海海峡表层沉积物与周边入海河流沉积物在 (Gd/Yb)_N-(La/Yb)_N 指标上的关系, 推断渤海海峡沉积物主要来源于黄河, 而东北部则呈现出明显的混合现象, 形成了一个黄河与辽东湾河流混合来源的格局。这说明渤海海峡的主要物源为黄河物质, 东北部的物源则主要受黄河和辽东湾河流的影响。此外, 鸭绿江以及朝鲜半岛入海的汉江和锦江与渤海海峡指标的差异较大, 表明鸭绿江以及朝鲜半岛入海物质对渤海海峡物源控制作用不明显(图 5)。

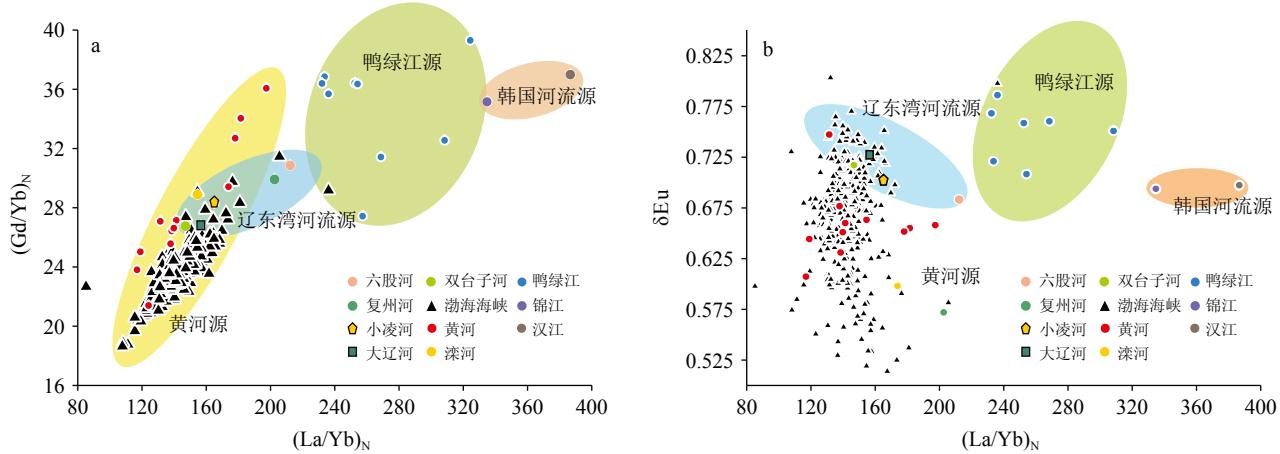
渤海沉积物的运输过程受季风环流的影响较为明显^[16], 同时黄河与辽东湾河流也提供了庞大的输沙量^[25]。因此, 渤海海峡的物源格局是黄河以及辽东湾河流沉积物在辽东湾和渤海湾环流共同作

表 2 渤海海峡表层沉积物各组分的相关关系 ($n=383$)

Table 2 Correlation among the components of surface sediment in the Bohai Strait ($n=383$)

	Σ REE	MZ	Zr	Th	Cr	Co	Rb	Sr	Ti
Σ REE	1								
MZ	0.502**	1							
Zr	0.780**	0.261**	1						
Th	0.941**	0.594**	0.743**	1					
Cr	0.888**	0.709**	0.640**	0.879**	1				
Co	0.394**	0.234**	-0.065	0.309**	0.375**	1			
Rb	0.670**	0.716**	0.400**	0.721**	0.813**	0.434**	1		
Sr	0.187**	-0.390**	0.108*	0.006	0.07	0.212**	-0.038	1	
Ti	0.878	0.620	0.734	0.834	0.936	0.218	0.693	0.117	1

注: **在0.01级别相关性显著, *在0.05级别相关性显著。

图 5 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$ 、 $\delta\text{Eu}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$ 物源判别图Fig.5 Discrimination of sediment provenance using $\delta\text{Eu}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$ and $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$

用下的结果。由于受季风的影响,辽东湾的冬季环流与夏季环流方向相反(图1),这使得辽东湾河流物质能够在冬季沿辽东半岛被输送到渤海海峡东北部^[24],这与前人通过重矿物和粒度等沉积学手段,认为渤海东部物源为古辽河沉积物的再循环^[16]的结论一致。黄海暖流通过渤海海峡北部进入渤海,与渤海沿岸流共同组成弱循环,驱动了黄河物质向渤海的扩散^[16,49],最终以渤海沿岸流的形式携带黄河物质经莱州湾从渤海海峡南部流出^[21]。长江的黏土粒级物质被黄海暖流携带北上最远至黄海36°N附近^[50],而西朝鲜海洋锋面将朝鲜半岛河流的影响范围限制在了北黄海东侧^[44,50],因此渤海海峡区域以黄河物质为主,东北部则混杂有辽东湾河流物质,几乎不受长江及朝鲜半岛河流的影响。

5 结论

(1)渤海海峡沉积物稀土元素总量为44.85~283.00 μg/g,平均为166.3 μg/g,以南、北隍城岛为中心,西部和南部海域含量较高(高于180 μg/g),而东北部海域则较低(低于160 μg/g)。轻稀土明显富集,重稀土明显亏损。通过球粒陨石标准化计算的δEu均值为0.67,呈中度亏损,Ce则几乎无异常。

(2)渤海海峡稀土元素总量的分布受沉积物粒度影响,而铁锰氧化物和化学风化作用的影响不明显;稀土元素配分模式与黄河及辽东湾河流较为一致,与鸭绿江及朝鲜半岛河流差异较大。

(3) $\delta\text{Eu}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{(La/Yb})_{\text{N}}$ 判别结果表明,渤海海峡表层沉积物主要来源于中国大陆的黄河,东北部则为黄河与辽东湾河流混合来源,辽东湾环流和渤海沿岸流共同控制了这一结果。

参考文献 (References)

- [1] Singh P R. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(18): 3093-3108.
- [2] Lim D, Jung H S, Choi J Y. REE partitioning in riverine sediments around the Yellow Sea and its importance in shelf sediments provenance[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 12-24.
- [3] Jung H, Lim D, Jeong D, et al. Discrimination of sediment provenance in the Yellow Sea: secondary grain-size effect and REE proxy[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2016, 123: 78-84.
- [4] 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 680-686. [JIANG Fuqing, LI Anchun. Geochemical Characteristics and Their Implications to Provenance and Environment of Surface Sediments from the South Okina wa Trough[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 680-686.]
- [5] Xue C T, Qin Y C, Ye S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clineform off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf[J]. *Earth Science Reviews*, 2018, 177: 478-496.
- [6] 虞义勇, 褚宏宪, 杨慧良, 等. 渤海海峡表层沉积物常量元素分布特征及其地质意义 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 52-62. [YU Yiyong, CHU Hongxian, YANG Huiliang, et al. Distribution of Major Elements in Surface Sediments of Bohai Strait and Its Geological Significance[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2019, 35(9): 52-62.]
- [7] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 渤海莱州湾沉积物REE与重金属污染特征及物源判别 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 8-24. [DUAN Yunying, PEI Shaofeng, LIAO Mingwen, et al. Characteristic of REE and Heavy Metals in the Surficial Sediments of Laizhou Bay, Bohai Sea and Their Implications for Provenance[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2021, 37(10): 8-24.]
- [8] Martin J M, Zhang J, Shi M C, et al. Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the Western Pacific Ocean[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1993, 31(3): 243-254.

- [9] Yang Z, Ji Y, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine coastal and shelf science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [10] Qiao S, Shi X F, Zhu A, et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2010, 86(3): 337-344.
- [11] 杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 等. 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 136-147. [YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, et al. Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(5): 136-147.]
- [12] 虞义勇, 王永红, 李日辉, 等. 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 51-58. [YU Yiyong, WANG Yonghong, LI Rihui, et al. Clay Minerals Distribution Pattern in Surface Sediments of Western Bohai and Their Provenance Implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 51-58.]
- [13] 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等. 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 [J]. 地球科学, 2016, 41(3): 463-474. [LAN Xianhong, LI Rihui, MI Beibei, et al. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 463-474.]
- [14] 王伟伟, 付元宾, 李树同, 等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区 [J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 478-485. [WANG Weiwei, FU Yuanbin, LI Shutong, et al. Distribution on Surface Sediment and Sedimentary Divisions in the Middle Part of Bohai Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(3): 478-485.]
- [15] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 1-12. [ZHANG Jian, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Grain Size Characteristics of Surface Sediments in the Northern Yellow Sea and Their Implications for Environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 1-12.]
- [16] Qin Y C, Mei X, Jiang X, et al. Sediment provenance and tidal current-driven recycling of Yellow River detritus in the Bohai Sea, China[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106473.
- [17] 王利波, 李军, 赵京涛, 等. 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 [J]. 海洋学报, 2014, 36(2): 66-74. [WANG Libo, LI Jun, ZHAO Jingtao, et al. Detrital mineral assemblages and distributions as indicators of provenance and dispersal pattern in surface sediments from Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(2): 66-74.]
- [18] 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析 [J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(5): 525-531. [WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of Surface Sediments and Sedimentary Environment in the Northern Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 525-531.]
- [19] 窦衍光, 李军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义 [J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 109-119. [DOU Yanguang, LI Jun, YANG Shouye. Element compositions and provenance implication of surface sediments in offshore areas of the eastern Shandong Peninsula in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 109-119.]
- [20] 密蓓蓓, 张勇, 梅西, 等. 南黄海表层沉积物稀土元素分布特征及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 93-103. [MI Beibei, ZHANG Yong, MEI Xi, et al. Distribution of rare earth elements in surface sediments of the South Yellow Sea and its implication to sediment provenances. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(6): 93-103.]
- [21] Fang Y, Fang G, Zhang Q. Numerical simulation and dynamic study of the winter time circulation of the Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2000, 18: 1-9.
- [22] Tian Z X, Zhang Y, Mei X, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the northern Bohai Strait, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194: 802.
- [23] 王海根, 王庆同, 杨鹏, 等. 庙岛群岛西部海域表层沉积物常量和稀土元素的分布特征及其物源指示意义 [J]. 海洋通报, 2023, 42(6): 695-706. [WANG Haigen, WANG Qingtong, YANG Peng, et al. Distribution features of major elements and rare earth elements of the surface sediments in the western Miaodao Archipelago and their provenance implications. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(6): 695-706.]
- [24] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. [IOCAS (Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences). *Geology of the Bohai Sea*[M]. Science Press, Beijing, 1985.]
- [25] Yuan X, Feng X, Hu R, et al. Study on the sediment transport flux and mechanism in the Bohai strait at the tidal and monthly scales in summer[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2023, 22(1): 75-87.
- [26] 陈义兰, 吴永亭, 刘晓瑜, 等. 渤海海底地形特征 [J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 75-82. [CHEN Yilan, WU Yongting, LIU Xiaoyu, et al. Features of Seafloor Topography in the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 75-82.]
- [27] Mei X, Li R H, Zhang X H, et al. Evolution of the Yellow Sea Warm Current and the Yellow Sea Cold Water Mass since the Middle Pleistocene[J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 442: 48-60.
- [28] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 466-453. [ZHAO Baoyi, ZHUANG Guowen, CAO Deming, et al. Circulation, Tidal Residual Currents and Their Effects on the Sediments in the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 466-453.]
- [29] 陆凯, 褚宏宪, 孙军, 等. 渤海海峡跨海通道地区海洋地质调查研究进展 [J]. 地质通报, 2021, 40(Z1): 287-297. [LU Kai, CHU Hongxian, SUN Jun, et al. Research progress of marine geological survey of the Bohai Strait[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(Z1): 287-297.]
- [30] Yang S, Jung H, Lim D, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth Science Review*, 2003, 63(1-2): 93-120.
- [31] 王金土. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学 [J]. *地球化学*, 1990,

- [31] 19(1): 44-53. [WANG Jintu. REE geochemistry of surficial sediments from the Yellow Sea of China[J]. *Geochimica*, 1990, 19(1): 44-53.]
- [32] 蓝先洪, 徐晓达, 王中波, 等. 渤海西部表层沉积物的稀土元素分布特征与物源约束 [J]. *地球学报*, 2018, 39(1): 37-44. [LAN Xian-hong, XU Xiaoda, WANG Zhongbo, et al. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements and Their Provenance Constraints in the Surface Sediments from the Western Bohai Sea[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(1): 37-44.]
- [33] 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 Zhaoyang, et al. Rare-Earth Elements in Continental Shelf Sediments of the China Seas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(1): 37-43.]
- [34] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2963-2980. [ZHU Laimin, GAO Zhiyou, YIN Guan, et al. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2963-2980.]
- [35] Taylor S R, Mcلنан S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 1985, 94(4): 57-72.
- [36] 古森昌, 陈绍谋, 吴必豪, 等. 南海表层沉积物稀土元素的地球化学 [J]. *热带海洋学报*, 1989, 2: 93-101. [GU Senchang, CHEN Shaomou, WU Biacao, et al. Geochemistry of Rare Earth Elements in Surface Sediments of the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1989, 2: 93-101.]
- [37] 张现荣, 李军, 窦衍光, 等. 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 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 684-691. [ZHANG Xianrong, LI Jun, DOU Yanguang, et al. REE Geochemical Characteristics and Provenance Discrimination of Core LDC30 in the Southeastern Part of Liaodong Bay[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 684-691.]
- [38] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物REE地球化学及示踪作用 [J]. *地球化学*, 1999, 28(4): 374-380. [YANG Shouye, LI Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments [J], *Geochimica*, 1999, 28(4): 374-380.]
- [39] 严杰, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口及近岸地区稀土元素的物源指示意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 95-103. [YAN Jie, GAO Jianhua, LI Jun, et al. The Source Indication Significance of Rare Earth Elements in the Yalu River Estuary and Nearshore Areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 95-103.]
- [40] 杨守业, 韦刚健, 夏小平, 等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3): 339-346. [YANG Shouye, WEI Gangjian, XIA Xiaoping, et al. Provenance Study of the Late Cenozoic Sediments in the Changjiang Delta: REE and ND Isotopic Constraints[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 339-346.]
- [41] 王庆同, 赵吉圆, 王海根, 等. 渤海海峡西南部海底沉积物重矿物组成与物源 [J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(6): 22-31. [WANG Qing-tong, ZHAO Jiyuan, WANG Haigen, et al. Composition and provenance of heavy minerals in surface sediments in the southwestern Bohai Strait[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(6): 22-31.]
- [42] McLennan, S M. Weathering and Global Denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [43] Tripathy G R, Singh S K, Ramaswamy V. M. Major and trace element geochemistry of Bay of Bengal sediments: implications to provenances and their controlling factors[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 397(1): 20-30.
- [44] Zhu Y T, Bao R, Zhu L H, et al. Investigating the provenances and transport mechanisms of surface sediments in the offshore muddy area of Shandong Peninsula: Insights from REE analyses[J]. *Journal of Marine Systems*, 2022, 226: 103671.
- [45] 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. Geochemical Characteristics and Source Significance of Rare Earth Elements in Sediments of the East China Sea Inland Shelf[J]. *Journal of Rare Earths*, 2009, 27(4): 574-582.]
- [46] 黄龙, 耿威, 王中波, 等. 渤海东部和黄海北部表层有用重砂资源及影响因素 [J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(5): 40-47. [HUANG Long, GENG Wei, WANG Zhongbo, et al. Characteristics and Influence Factors of Valuable Heavy Minerals in Surface Sediments of the Eastern Bohai Sea and the Northern Yellow Sea[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2016, 32(5): 40-47.]
- [47] 袁萍. 渤海表层沉积物的空间分布及其与物源和沉积动力环境的关系 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [YUAN Ping. Distribution of surface sediment in the Bohai Sea and its relationship with sediment supply and sedimentary dynamic environment[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [48] Kritsanuwat R, Sahoo S K, Fukushi M, et al. Distribution of rare earth elements, thorium and uranium in Gulf of Thailand's sediments[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 3361-3374.
- [49] Xue C T, Qin Y C, Ye S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinoform off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 17: 478-496.
- [50] 李辉, 韩宗珠, 闫天浩, 等. 稀土元素配分曲线的相似性度量算法及其在黄海沉积物物源判别中的应用 [J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(12): 88-97. [LI Hui, HAN Zongzhu, YAN Tianhao, et al. Similarity measurement algorithm of REE distribution curve and its application for provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(12): 88-97.]