



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

黄龙, 耿威, 陆凯, 田振兴, 张勇, 温珍河

Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6

HUANG Long, GENG Wei, LU Kai, TIAN Zhenxing, ZHANG Yong, and WEN Zhenhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

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

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 Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

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

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄龙, 耿威, 陆凯, 等. 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 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 92-105.
HUANG Long, GENG Wei, LU Kai, et al. Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 92-105.

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

黄龙^{1,2}, 耿威^{1,2}, 陆凯^{1,2,3}, 田振兴^{1,2}, 张勇^{1,2}, 温珍河^{1,2}

1. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
2. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
3. 中国海洋大学海洋地球学院, 青岛 266100

摘要: 对南黄海中部 SYSC-1 孔 0~30 m 段岩芯稀土元素 (REE) 和粒度进行分析, 结合年代测定, 研究了沉积物 REE 组成特征及其影响因素, 并对其物质来源变化进行了探讨。结果表明, Σ REE 含量为 111.66~231.12 $\mu\text{g/g}$, 垂向分布变化较大, 均值与中国黄土 Σ REE 均值比较接近。 Σ REE 与粒度变化有一定的相关性, 但 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 等参数受粒级影响较小。稀土元素分异参数有效示踪了物质来源, 与周边河流对比发现, SYSC-1 孔沉积物 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 散点图分布位置与黄河和长江较为一致, 而与朝鲜半岛河流有明显不同。REE 判别函数 (DF) 的物源区分结果表明, 钻孔 MIS6 期经历了一次大的物源转换, 沉积物由长江源 (27.98~30 m) 转为黄河源 (24.24~27.98 m)。MIS5.5—MIS5.1 期间 (24.24~16.98 m) 发育了浅水陆架冷水团沉积, 主要是长江源细颗粒沉积物被古黄海暖流由南往北携带而来, 并在冷涡区附近沉积下来。MIS5.1—MIS1 期间 (16.98~3 m) 的低海平面时间较长, 主要发育了一套滨浅海相-河口/潮坪相-三角洲相沉积, 随着海平面急剧下降, 陆架可容纳空间缩小, 导致黄河、长江入海口向陆架区移动, 黄河沉积物质控制了钻孔所处的南黄湖北部区域。MIS1 中晚期, 山东半岛沿岸流的形成将黄河沉积物质主要控制在南黄海西部附近海域, 而黄海暖流将济州岛西南部泥质区的长江源细颗粒物质搬运至 SYSC-1 孔附近的冷涡区沉积下来。总体来说, MIS6 期以来南黄海中部海域沉积演化是西太平洋边缘海河海相互作用的一个典型范例, 海平面波动和海洋环流变化在物源转换过程中发挥了重要作用。

关键词: 稀土元素; 物源; MIS6 期以来; 南黄海中部

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072501

Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6

HUANG Long^{1,2}, GENG Wei^{1,2}, LU Kai^{1,2,3}, TIAN Zhenxing^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, WEN Zhenhe^{1,2}

1. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
2. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China
3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100

Abstract: Rare earth elements (REE) and grain size in the 0~30 m section of Core SYSC-1 sediments taken from the Central South Yellow Sea were analyzed. Combined with geochronologic age dated, the composition characteristics and influencing factors of REE in sediments were studied, and the changes in their material sources were discussed. The vertical distribution of Σ REE varied greatly from 111.66 to 231.12 $\mu\text{g/g}$, and the average value is similar to loess REE in China. A certain correlation between Σ REE and grain size variation was revealed. The value of $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$, and $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ were less affected by particle size, which effectively reflected the provenance of sediments. Compared with the sediments of surrounding rivers, the distribution of $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ and $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ in scatter map are close to those of the Yellow River and the Yangtze River, but significantly different from those of the rivers in the Korean Peninsula. The provenance results of REE discriminant function (DF) show that the borehole experienced a sudden change in provenance during MIS6 from the Yangtze River source (27.98~30 m) to the Yellow River source (24.24~27.98m). During the MIS5.5—MIS5.1, shallow shelf cold water mass deposits (24.24~16.98 m) were developed. They were mainly composed of fine-grained sediments from the source of the Yangtze River, which were carried out northward by the ancient Yellow

资助项目: 中国地质调查局地质调查专项项目 (DD20190205, DD20190208, DD20221710, DD20191003)

作者简介: 黄龙 (1983—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地质研究, E-mail: huanglong0919@126.com

通讯作者: 陆凯 (1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋地质调查与研究, E-mail: qimg_luk@163.com

收稿日期: 2022-07-25; 改回日期: 2022-09-05. 张现荣编辑

Sea warm current, and deposited near the cold vortex area. During the low sea level period from MIS5.1 to MIS1 (16.98~3 m), a set of littoral and shallow sea, estuarine/tidal flat and delta deposits were mainly developed. With the rapid decrease of sea level, the shelf accommodation space was reduced, which led to the shift of estuaries of the Yellow River and the Yangtze River towards shelf area, and the Yellow River sediments controlled the northern area of the South Yellow Sea. In the middle and late MIS1, the formation of the Shandong Peninsula coastal current mainly confined the Yellow River sediments to the western part of the South Yellow Sea, while the Yellow Sea warm current transported the fine particles of the Yangtze River source to the cold vortex area near the core SYSC-1 in the southwest of Jeju Island. In general, the sedimentary evolution of the central area of the South Yellow Sea since MIS6 is a good example of interaction between sea and river in the western Pacific margin. Sea level fluctuations and ocean circulation changes play an important role in the change of provenance.

Key words: rare earth element; provenance; MIS6; the Central South Yellow Sea

南黄海是一个典型的半封闭陆表海, 地势平坦, 位于稳定的平坦大陆架上。南黄海在晚第四纪冰期-间冰期经历了剧烈的海平面升降, 接纳了大量周缘河流携带而来的陆源物质, 为研究河海相互作用提供了一个天然实验室^[1-2]。

黄河和长江作为中国最长的河流, 被认为是晚第四纪期间南黄海的主要沉积物来源^[3]; 朝鲜半岛河流紧靠南黄海, 也影响了南黄海的物质来源^[4]。这些不同河流来源沉积物在南黄海的搬运机制、沉积范围引起了众多研究者的广泛研究^[5-6], 并初步得出在不同区域内, 黄河、长江和朝鲜半岛河流物源影响不尽相同的结论^[7-8]。多数研究认为, 南黄海西部主要接收了黄河带来的物质^[9-10]。南黄海东部靠近朝鲜半岛附近区域的沉积物来源尚有争议, 部分研究者认为来源于中国大陆河流, 也有研究者认为由韩国河流提供^[11]。南黄海中部泥质区物质来源具有多源性, 被称为“多源现代泥”^[12]。过去的这些物源研究大多集中于全新世沉积物^[13-15], 而随着南黄海附近海域长取芯钻孔的增多, 关于全新世之前层段中松散沉积物的物质来源也开始引起了部分学者的关注^[2,16-17]。大陆架科学钻探计划实施的 CSDP-01 孔从矿物学和 Sr-Nd 同位素角度揭示了 3.5 Ma 以来较长尺度的物源演变, 认为南黄海西部在 0.8 Ma 时发生了由长江源转为黄河源的重大变化^[18]。而更多末次冰期以来的物源研究表明, 长江源物质依然严重影响着南黄海的沉积物分布^[19]。稀土元素研究结果证实晚更新世早期 (MIS5) 长江源物质主导着南黄海中部泥质区物质组成^[20]。沉积学和地震剖面研究显示, 在 MIS3 时期, 南黄海西部和东海陆架北部发育了大范围的埋藏型三角洲体, 估计沉积时间约为 40~60 ka, 随后受到河道切割的影响, 这些埋藏型三角洲体被认为是长江和黄河共同控制的三角洲复合体^[1-2,21]。然而, 关于 MIS3 期间南黄海西部发育的长江和黄河三角洲沉积是否曾经进入南黄海中东部的研究非常有限^[22-23]。另一个值得注意的物源问题是, MIS5 和 MIS1 时期的

海平面高度相似^[24], 南黄海陆架区在 MIS5 高海平面时期的沉积物来源、输运与 MIS1 时是否具有相似性和可比性也需要进一步研究。

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, 使得海底沉积物 REE 记录着源区的沉积环境信息^[25], 因此 REE 在物源示踪中运用很广^[26]。近年来, 许多学者对西太平洋边缘海和周缘主要河流沉积物开展了 REE 地球化学特征、控制因素等多种研究^[27-31], 并通过 REE 含量配分模式和一些重要 REE 参数的对比等, 在钻孔沉积物物源识别方面取得了很好的效果^[30]。

本文对南黄海中部 SYSC-1 孔岩芯沉积物开展 REE 分析, 并结合粒度特征分析和测年结果, 探讨了时间序列体系内的物源演化与海平面波动及海洋环流变化的关系, 为南黄海晚更新世以来的沉积环境变化、物质来源和搬运机制等研究提供了新的地质证据, 丰富了南黄海海域的研究成果。

1 区域地质背景

南黄海位于中国大陆和朝鲜半岛之间, 在西北侧和南侧与渤海、东海连接, 大部分海区水深小于 80 m。南黄海现代海洋流系主要受黄海暖流、沿岸流、黄海冷水团和长江冲淡水的影响^[32]。黄海暖流是由对马暖流水和东海陆架混合水交汇所形成的锋区中衍生出来的, 由济州岛西侧进入南黄海, 存在明显的季节变异, 冬季黄海暖流对南黄海营养盐的分布和运输有明显影响, 对深层影响尤其明显^[33]。沿岸流分布在黄海沿岸区, 东西两侧分别为流向南的山东半岛沿岸流和朝鲜半岛沿岸流。黄海冷水团和长江冲淡水则主要发育在夏半年, 分别位于南黄海中部和南部海域。

南黄海的大地构造位置位于扬子克拉通的下扬子地块, 主要的构造单元为南黄海盆地。南黄海新生代盆地基底之上主要形成了一套新近系—第

四系海陆交互相地层^[34]。浙闽隆起带是分隔南黄海盆地和东海陆架盆地的火山岩构造带,新近纪以来浙闽隆起经历分裂、沉降,至约 1.66 Ma 海水从东海越过浙闽隆起进入黄海;随着浙闽隆起的进一步沉降至约 0.83 Ma,南黄海在之后的间冰期高海平面时期其海洋环境与现今基本类似,浙闽隆起对海水入侵南黄海的阻隔作用基本消失^[35]。

2 材料与方法

SYSC-1 孔岩芯为青岛海洋地质研究所利用“勘 407”调查船于 2018 年 5 月在南黄海中部完成的全取芯钻孔(图 1),钻孔坐标 35°47'43.6"N、123°44'5.5"E,水深约 75 m,总进尺 150.1 m,其中砂质沉积物取芯率均值大于 65%,泥质沉积物取芯率均值大于 85%。

钻孔岩芯在实验室中被对半分成两部分,随后

对其进行沉积特征描述和拍照。对工作的一半进行取样和分析,获得沉积学、地球化学等参数,表征不同岩相的沉积环境。在本研究中,我们主要关注整个岩芯的上部 30 m,其中沉积物年龄由加速器质谱仪碳测年(AMS¹⁴C)和光释光测年(OSL)结果有效建立。

在钻孔中微体古生物富集和发育完整生物贝壳的层段挑选 AMS¹⁴C 测年物质,共计挑选了 2 个底栖有孔虫样品和 1 个完整生物贝壳送至美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测试,数据用 Calib7.0.1 软件校正至日历年龄。光释光测试样品通过暗盒在避光条件下从岩芯中取出并用锡箔纸包裹密封保存,共计取样 11 个,在中国科学院青海盐湖研究所光释光实验室完成,在暗室中进行样品前处理,将未曝光的样品去除碳酸盐和有机质后湿筛提取 38~63 μm 组分,再去除长石和氟化物沉淀后,采用单片再生法和标准生长曲线法相结合的方法在

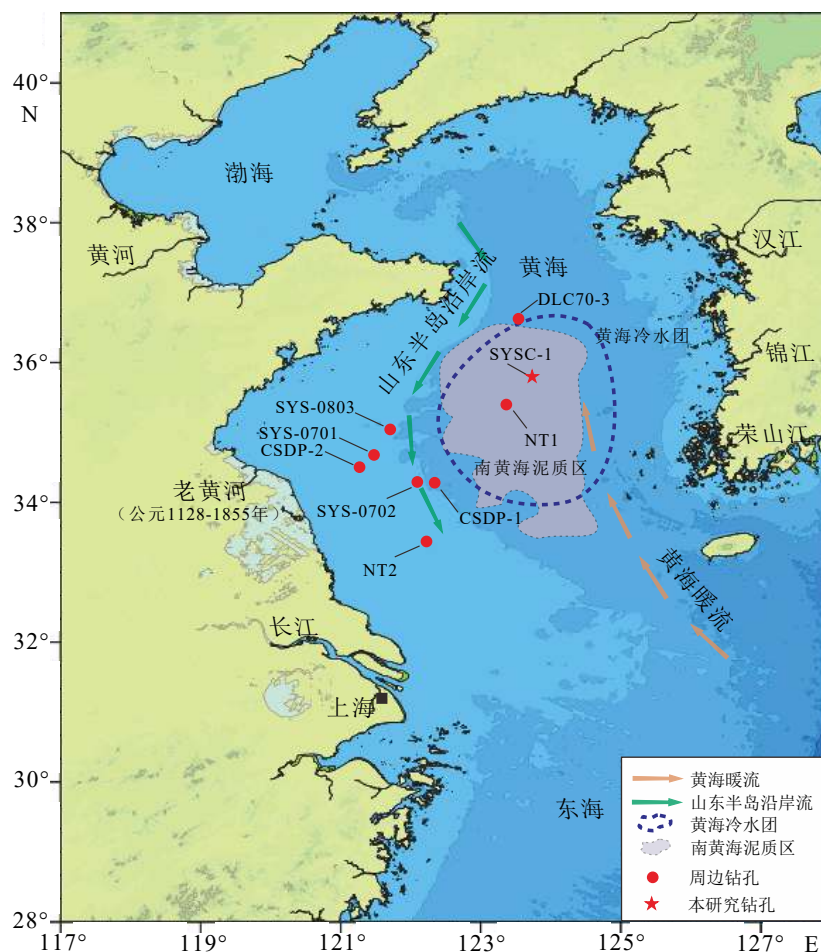


图 1 SYSC-1 孔及周边钻孔^[1,20,33,35-37] 位置分布图

环流据文献^[32]。

Fig.1 Location of core SYSC-1 and surrounding cores^[1,20,33,35-37]

The circulation data is from reference^[32].

Risø TL/OSL-DA-20 全自动释光仪上进行测定。通过中值年代模型得出最终的等效剂量, 通过样品 U、Th、K 含量计算获得样品每年接受的辐射剂量。等效剂量与年剂量的比值即是样品自最后一次曝光至今的沉积年龄。常规石英颗粒的光释光测年上限可以达到 100 ka^[38]。

粒度分析和稀土元素所用样品以 30~40 cm 的间隔采集, 各从 SYSC-1 岩芯采集并分析了 89 个样品, 均由青岛海洋地质研究所实验测试中心完成测试。粒度分析按海洋地质调查技术规范要求进行处理, 取适量样品置于烧杯中, 先后各加入过量的 30% 的 H₂O₂ 和 0.25 mol/L 的 HCl 溶液消除有机质和生物贝壳及钙质胶结物的影响, 用去离子水加烧杯静置 24 h, 除去上清液, 离心清洗两次去除剩余的 H₂O₂ 和 HCl, 加少许蒸馏水, 经超声波充分分散后进行测试。测试所用仪器为英国 Malvern 公司产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪。分析结果间隔 1/4 Φ, 重复测量的相对误差小于 2%。

稀土元素样品测试流程如下: 试样初步高温干燥、冷却, 置于聚四氟乙烯密闭溶样罐中, 再经硝酸、氢氟酸处理使稀土元素形成氢氧化物沉淀, 加三乙醇胺掩蔽铁、铝, 加 EDTA 络合钙、钡, 过滤。

稀土元素氢氧化物沉淀溶于 2 mol/L 盐酸, 经硝酸阳离子交换树脂分离富集后, 再用 5 mol/L 盐酸洗提, 蒸发定容后采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu 等 14 种稀土元素含量。测试时采用国家一级标准物质比对、密码样品的双份分析和试样全分析百分数加和的手段进行质量监控, 分析过程中进行了重复样和标样分析, 稀土元素分析的相对偏差小于 5%。

3 结果分析

3.1 测年结果和地层年代序列

钻孔上部 30 m 主要发育了一套细颗粒沉积物, 平均粒径均值 6.75 Φ, 沉积物粒度变化比较稳定 (图 2), 平均粒径为 5.07~7.86 Φ。3 个 AMS¹⁴C 测年结果 (表 1) 显示, 自上而下年龄序列正常, 0.4 m 和 3.2 m 处的有孔虫测年结果分别为 1347 aBP 和 10901 aBP, 7 m 处的贝壳测年结果大于 43 500 aBP, 接近 AMS¹⁴C 测年上限, 在此仅用作参考。11 个 OSL 测年结果 (表 1) 反映沉积年龄序列整体上基本

表 1 SYSC-1 孔 AMS¹⁴C 和光释光 (OSL) 测年结果

Table 1 AMS¹⁴C and OSL ages in core SYSC-1

测年方法	深度/m	材料	δ ¹³ C/‰	惯用年龄/aBP	日历年龄/cal.aBP		Beta-No.	
					中值	范围		
AMS ¹⁴ C	0.40	有孔虫	0	1800±30	1347	1205~1488	5520578	
	3.20	有孔虫	-2.8	9960±30	10901	10705~11097	5520579	
	7.00	贝壳	-9.1	>43 500	-	-	528761	
OSL	深度/m	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	含水率/%	剂量率/(Gy/ka)	等效剂量/Gy	OSL/ka
	3.70	1.71±0.3	9.37±0.6	1.97±0.04	22±5	0.92±0.08	58.2±0.8	63.4±5.2
	6.00	2.81±0.3	10.02±0.6	1.91±0.04	20±5	3.02±0.23	186.5±5.8	61.8±5.0
	7.00	2.08±0.3	10.02±0.6	1.85±0.04	18±5	2.85±0.22	166.6±7.6	58.4±5.2
	9.30	1.65±0.3	9.57±0.7	1.92±0.03	20±5	2.70±0.21	180.2±6.5	66.8±5.7
	11.50	1.7±0.3	10.52±0.6	1.77±0.03	21±5	2.63±0.20	172.5±2.4	65.6±5.0
	12.60	1.96±0.3	10.68±0.6	1.87±0.03	19±5	2.85±0.22	180.2±4.3	63.3±5.1
	14.70	1.11±0.3	6.27±0.6	1.79±0.03	16±5	2.25±0.18	174.5±8.2	77.6±7.2
	15.70	1.71±0.3	9.13±0.6	1.75±0.03	19±5	2.59±0.19	289.1±17.0	111.7±10.6*
	23.90	1.81±0.3	9.52±0.6	1.83±0.03	19±5	2.71±0.21	328±17	121±11*
	26.64	1.91±0.3	9.43±0.6	1.88±0.03	20±5	2.72±0.21	325±20	119±12*
29.50	1.77±0.3	10.31±0.6	1.97±0.03	20±5	2.82±0.22	350.2±15.4	129±13*	

*光释光年龄超过极限值, 仅做参考使用。

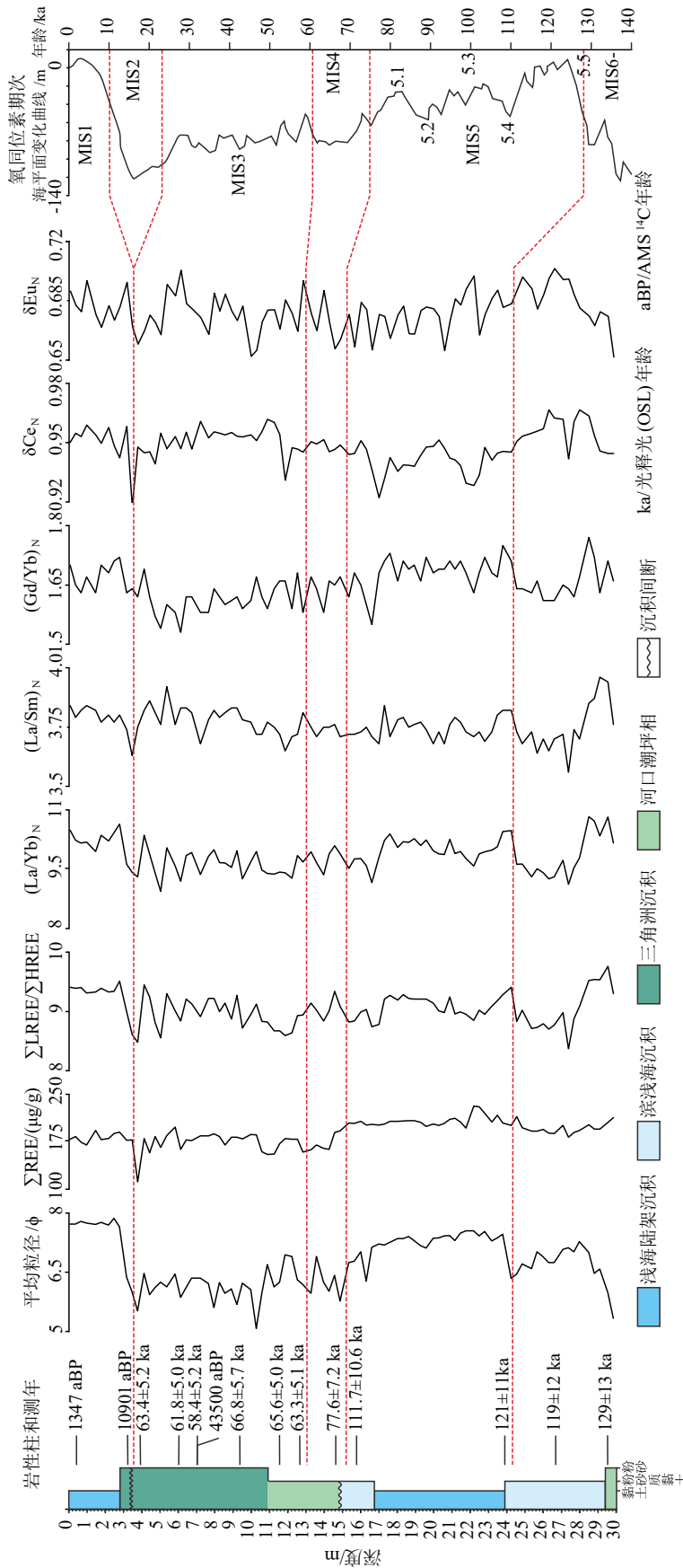


图 2 SYSC-1 孔稀土元素相关参数及海平面变化曲线^[23]
 球粒陨石标准化值数据文献 [39] (以 N 下标表示)。
 The Normalized chondrite REE data are from reference [39].

Fig. 2 Vertical change of relevant parameters of REE and global sea level^[23] in core SYSC-1. The subscript N represents the chondrite normalized value

正常, 上半段(3.7~14.7 m)的 7 个测年结果介于 58.4±5.2~77.6±7.2 kaBP, 其中上面的 6 个 OSL 年龄接近, 部分年龄出现了新老倒置现象, 可能是陆架区低海平面时期的冲刷侵蚀再沉积作用导致年龄出现偏差, 7 m 处的 OSL 年龄为 58.4±5.2 kaBP, 与 AMS¹⁴C 年龄较好的相互佐证。钻孔 3.7 m 处 OSL 年龄突然增加到 63.4±5.2 ka, 结合岩性变化, 推测在 3.4 m 左右存在沉积间断, 这一地层缺失现象在 MIS2 期间普遍存在于南黄海及邻近海域钻孔岩心中^[25]。下半段(15.7~29.5 m)的 4 个测年结果为 111.7±10.6~129±13 kaBP, 均大于 100 kaBP, 超出了常规石英颗粒年龄的上限。在周边海域(图 1)多个钻孔的相似层位中均发现了一套细颗粒的泥质沉积, 普遍认定为 MIS5.5 期时的浅海相冷水团沉积^[39], 这与 16.98~24.24 m 段的细颗粒沉积(平均粒径均值 7.35 Φ)非常相似。

综合沉积物 AMS¹⁴C、OSL 测年结果和粒级变化特征, 并与南黄海地区多个钻孔的晚第四纪沉积地层年龄结果及全球海平面变化曲线对比分析^[1,20,24,33,35-37], 基本可以建立 SYSC-1 孔上部 30 m 的年龄框架。钻孔 24.24 m 以下为 MIS6 期的沉积, 3.2 m 以上为 MIS1 期的沉积, 中间大致为 MIS5 期至 MIS3 期的沉积。其中, 24.24~14.8 m 段以细颗粒沉积物为主, 14.8 m 之上沉积物相对较粗, 推测分别为 MIS5 期高海平面时和 MIS4 期至 MIS3 期低海平面时的沉积。

3.2 稀土元素的垂向变化特征

钻孔沉积物平均粒径和 14 种稀土元素含量及其参数值如表 2 所示^[4,26,40-42], 其垂向变化特征见图 2。沉积物中总稀土元素(ΣREE)含量波动较大, 为 111.66~231.12 μg/g, 平均值为 189.35 μg/g(表 2)。SYSC-1 孔的 ΣREE 含量均值高于黄海(134.03 μg/g)和东海(140.34 μg/g), 低于渤海(229.29 μg/g)的平均含量^[26], 与中国大陆架沉积物的 ΣREE 平均含量 156 μg/g 相比较, 与黄土 ΣREE 含量均值(185 μg/g)相近^[43]。

轻稀土元素(LREE: La—Eu)的总量为 99.89~207.65 μg/g, 均值为 170.51 μg/g, 相对较富集, 约占总稀土含量的 89%; 重稀土元素(HREE: Gd—Lu)丰度较低, 总量为 11.77~23.47 μg/g, 平均值为 28.84 μg/g, 约占 ΣREE 的 11%。从 ΣREE 垂向变化特征看, ΣREE 含量变化与平均粒径的变化趋势较一致。依据 ΣREE 含量变化趋势可将钻孔分为两段(图 2): 上段(0~14 m) ΣREE 含量明显相对较低(174.75 μg/g), 含量波动幅度较大, 随着深度的减小而呈降低的趋势; 下段(14~30 m) ΣREE 含量相对较高(202.99 μg/g), 在垂向上比较稳定, 没有明显的波动变化; ΣLREE/ΣHREE 值变化比较复杂, 波动频繁且幅度较大。

3.3 稀土元素配分模式

对 REE 进行标准化是表征地质体类型的最明

表 2 SYSC-1 孔沉积物各稀土元素含量

Table 2 Contents of rare earth elements of core SYSC-1 sediments

沉积物	MZ/Φ	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(δCe) _N	(δEu) _N	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	
SYSC-1	最大值	7.86	50.08	94.34	11.30	42.07	8.24	1.72	7.01	1.17	5.99	1.29	3.51	0.54	3.45	0.51	231.12	0.97	0.70	10.83	3.96	1.77
	最小值	5.08	24.17	45.59	5.25	20.17	3.92	0.79	3.45	0.56	3.04	0.67	1.79	0.28	1.71	0.27	111.66	0.92	0.65	8.94	3.56	1.53
	平均值	6.75	40.91	78.25	9.13	34.25	6.63	1.34	5.64	0.93	4.83	1.04	2.80	0.44	2.74	0.41	189.35	0.95	0.68	9.84	3.76	1.65
黄河 ^[4]		31.00	61.80	7.15	26.90	5.02	0.97	4.92	0.65	3.90	0.72	2.29	0.30	2.16	0.30	148.08	0.97	0.60	9.48	3.76	1.83	
黄河 ^[26]		28.97	53.92	7.07	26.67	4.99	1.04	4.65	0.75	3.92	0.84	2.23	0.35	2.05	0.31	137.76	0.88	0.67	9.33	3.54	1.82	
长江 ^[26]		36.09	65.08	8.33	32.60	6.09	1.30	5.58	0.85	4.71	0.98	2.56	0.37	2.23	0.33	167.10	0.88	0.69	10.69	3.61	2.01	
长江 ^[4]		39.50	78.70	8.87	33.60	6.37	1.30	5.98	0.82	4.74	0.89	2.71	0.35	2.48	0.35	186.66	0.98	0.65	10.52	3.78	1.94	
锦江 ^[39]		59.28	103.10	12.81	38.35	6.61	1.33	5.20	0.79	4.04	0.76	2.01	0.29	1.77	0.27	236.61	0.88	0.70	22.12	5.47	2.36	
汉江 ^[39]		76.94	140.50	16.47	44.21	7.50	1.52	6.56	1.08	5.31	1.26	2.76	0.48	3.09	0.46	308.14	0.92	0.67	16.44	6.25	1.70	
荣山江 ^[39]		46.05	78.03	10.09	31.16	5.45	1.15	4.37	0.69	3.64	0.70	1.98	0.29	1.81	0.30	185.71	0.85	0.73	16.80	5.15	1.94	
球粒陨石 ^[40]		0.32	0.81	0.12	0.60	0.19	0.07	0.26	0.05	0.33	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03							
上陆壳 ^[41]		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							

La-ΣREE 含量 (μg/g); 球粒陨石标准化值据文献^[39] (以下标N表示)。

显、有效的形式^[31]。钻孔沉积物 REE 上陆壳^[42] 标准化模式如图 3 所示。钻孔沉积物 REE 含量虽然有差别,但不同深度沉积物 REE 配分模式具有明显的一致性(图 3a),呈近似的直线展布趋势,基本处于水平平行的状态,Ce 呈弱负异常(δCe 均值 0.92),Eu 呈稍弱的正异常(δEu 均值 1.03),且均表现为中稀土元素(MREE: Sm—Ho)相对富集的特征,表明岩芯的物质来源比较稳定。由配分模式曲线分布特征来看,长江和黄河沉积物均表现为 MREE 不同程度的富集,长江沉积物 REE 含量高,LREE 含量较黄河呈现富集的特征,这主要与流域源岩背景差异有关,黄河沉积物近 90% 物质来自黄土高原,以蒸发盐和碳酸盐类风化物为主,土壤呈碱性,在沉积岩中属于 REE 含量偏低的类型^[43];而长江流域中上游及下游地区中酸性火成岩多有出露,与酸性岩有关的 REE 矿产分布较广,导致长江沉积物中 REE 含量相对黄河流域具有较高的背景值^[44]。锦江、汉江及荣山江等朝鲜半岛河流沉积物的 REE 配分模式明显异于长江和黄河,LREE 富集与 HREE 亏损的特征更加明显,呈斜线型展布,可能主要因为流域主要由侏罗纪和白垩纪的花岗岩、前寒武纪的片麻岩以及第四纪的松散冲积物组成,而碳酸盐出露很少^[40]。经与黄海周边主要河流的标准化曲线相比(图 3b),SYSC-1 孔沉积物 REE 与朝鲜半岛河流差异较大,更接近于黄河和长江的配分曲线特征。

3.4 稀土元素分馏特征

稀土元素分析时,通常用 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、

$(Gd/Yb)_N$ 、 $(\delta Ce)_N$ 和 $(\delta Eu)_N$ 等典型参数来反映总稀土元素和轻、重稀土元素各自内部的分馏特征。 $(La/Yb)_N$ 一般用于指示总稀土元素中轻、重稀土元素之间的分馏特征,比值越大,说明轻稀土元素越富集。 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 的比值越大,说明轻稀土元素和重稀土元素内部分异特征越是明显^[25]。 $(\delta Ce)_N$ 和 $(\delta Eu)_N$ 则分别是反映氧化还原环境和陆源碎屑供应的重要指标^[31]。稀土元素分馏特征的典型参数值如表 2 所示: $(La/Yb)_N$ 变化范围为 8.94~10.83,平均值为 9.84,表明沉积物中轻、重稀土元素分异较明显; $(La/Sm)_N$ 值为 3.5~3.96,均值 3.76, $(Gd/Yb)_N$ 均值为 1.65。SYSC-1 孔各分异参数的垂向变化特征如图 2 所示, $(La/Yb)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 和 $\sum LREE/\sum HREE$ 变化趋势较一致,其曲线垂向上又可进一步分为 5 段,在 0~3、17.28~19.58 和 28.5~30 m 段出现了较高值区,曲线变化比较平稳,说明轻稀土元素相对富集,均值低于朝鲜半岛河流沉积物,与长江沉积物比较接近(表 2);另外 2 个层段则出现了低值区,曲线波动频繁且幅度较大,均值特征与黄河沉积物相近(表 2)。

$(\delta Ce)_N$ 和 $(\delta Eu)_N$ 的垂向变化分段性不明显, $(\delta Ce)_N$ 为 0.92~0.97,平均值为 0.95,Ce 含量具有微弱的负异常,这可能与生物碳酸盐等自生沉积物有关^[45]。

$(\delta Eu)_N$ 为 0.65~0.7,平均值为 0.68, Eu 呈典型的负异常,主要继承了陆源碎屑的属性特征。

海洋沉积物中 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分馏作用影响较

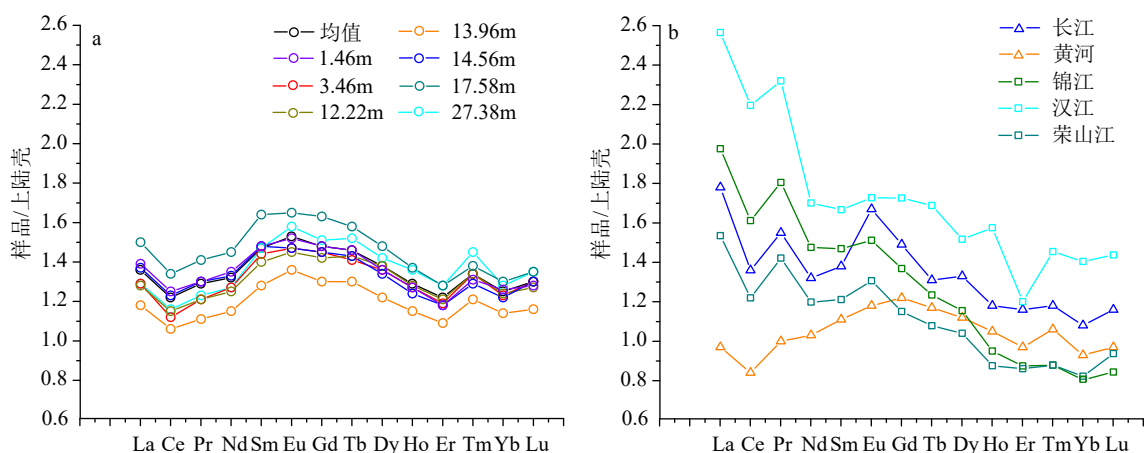


图 3 SYSC-1 孔与周边主要河流稀土元素上陆壳标准化配分模式

上陆壳标准化值据文献^[42]。a. SYSC-1 孔部分沉积物稀土元素上陆壳标准化曲线, b. 周边河流沉积物稀土元素上陆壳标准化曲线。

Fig. 3 The UCC-normalized REE distribution patterns of core SYSC-1 and major rivers in the region

The UCC-normalized REE data are from reference^[42]. a: The UCC-normalized REE distribution curves in some sediments of core SYSC-1,

b: The UCC-normalized REE distribution curves of surrounding river sediments.

小, 典型分馏特征参数受粒度影响不大。选择 $(La/Yb)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 、 $(\delta Ce)_N$ 和 $(\delta Eu)_N$ 等表征 REE 分馏的特征参数计算它们与平均粒度的相关性(图 4), 相关系数 R^2 分别为 0.1、0.23、0.03 和 0.04, 相关性极低, 表明 SYSC-1 孔岩芯沉积物中稀土元素的分馏几乎不受粒度的控制。

4 讨论

4.1 稀土元素的制约因素

陆源碎屑沉积物中元素组成受到源岩类型、源区风化作用和矿物组成差异等一系列因素的影响^[31]。已有研究发现, 对于有较稳定物源的海洋沉积物来说, 搬运过程中由分选作用引起的沉积粒度和矿物组成差异是控制其 REE 组成的重要因素^[28]。REE 具有通过类质同象作用进入黏土矿物的晶格中的特点, 致使 REE 易于在黏土和粉砂质黏土等细颗粒沉积物中富集^[27]。SYSC-1 孔 ΣREE 含量较低 ($174.75 \mu g/g$) 的层段 (0~14 m), 沉积物平均粒径均

值为 6.50Φ , 而 ΣREE 含量较高 ($202.99 \mu g/g$) 的层段 (14~30 m), 沉积物平均粒径均值为 6.97Φ , ΣREE 也基本符合这种规律。通过计算钻孔整体 ΣREE 含量与平均粒径相关性, 相关系数为 0.22, 呈弱的正相关关系, 说明了粒度对钻孔沉积物的 REE 有影响, 但作用并不显著, 这一现象与其他学者在周边海域分析结果一致^[36]。

沉积物中一些重矿物对 REE 含量及配分形式也会产生影响, HREE 趋向富集于锆石、电气石、石榴子石等矿物中^[46], 这些稳定重矿物受粒级的影响较大, 通常粗碎屑中的含量相对较高。SYSC-1 孔 3~16.98 m 段 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 值明显较低 (8.95), 与之对应的沉积物平均粒径也较粗 (6.26Φ), 可能与该段粗碎屑中稳定重矿物含量较高有关。

4.2 物质来源探讨

不同河流的入海物质判别和扩散模式一直是黄海源汇过程的难题, 近几年围绕南黄海晚第四纪时期的物源研究更是成为了热点问题^[40]。黄海周边黄河、长江及朝鲜半岛河流为黄海提供了丰富的

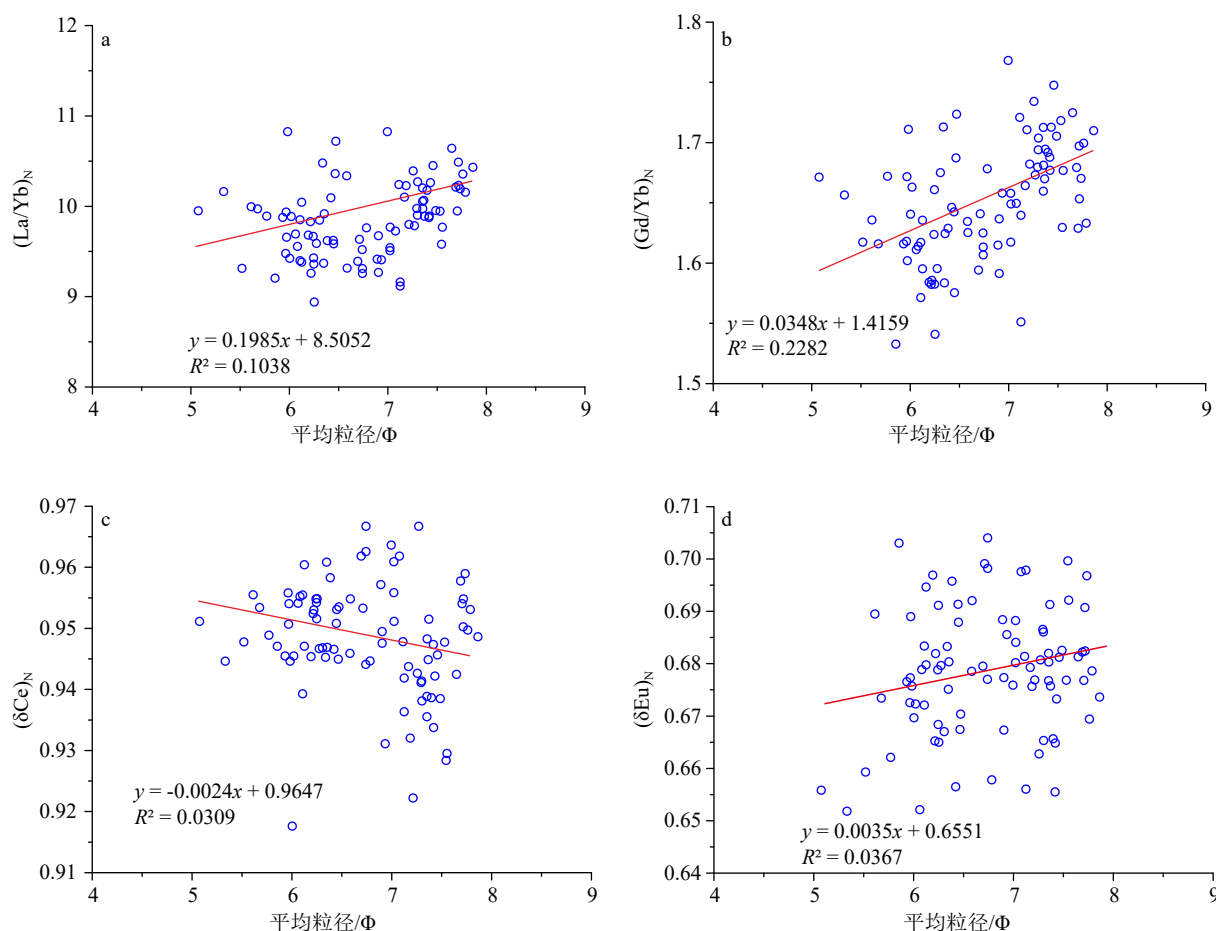


图 4 SYSC-1 孔稀土元素特征参数与平均粒径相关性

Fig.4 Correlations between characteristic parameters of REE and gran size of core SYSC-1

物质,特别是中国大陆的黄河和长江,每年的输沙量超过10亿t。

$(La/Yb)_N$ 与 $(\delta Eu)_N$ 分别是指示 LREE 和 HREE 分异特征、反映碎屑物源组成的两个重要参数,可以较好地指示物源信息^[4]。鉴于 SYSC-1 孔沉积物中 $(La/Yb)_N$ 与 $(\delta Eu)_N$ 的粒级效应并不显著(图 4a、d),也适合用来进行物源分析。选择这两个参数与周边河流输入物质 REE 的相关数据进行对比分析(图 5)。SYSC-1 孔 0~30 m 段的稀土元素参数投点全部集中在中国大陆河流(黄河和长江)沉积物

的附近(图 5a),与锦江、汉江和荣山江沉积物存在明显不同,投点位置距离朝鲜半岛河流沉积物非常远,说明沉积物均来自中国大陆河流,主要为黄河源、长江源或两者的混合沉积物。与朝鲜半岛河流沉积物 REE 特征相比,虽然黄河和长江沉积物的 REE 相似性较高,但基于这 2 个参数的垂向变化特征(图 2)进行分层物源判别,从投点结果来看(图 5b—f),不同时期黄河和长江输入物质在 SYSC-1 孔中的影响存在差异。

海洋沉积物 REE 判别函数(DF)已被广泛用来

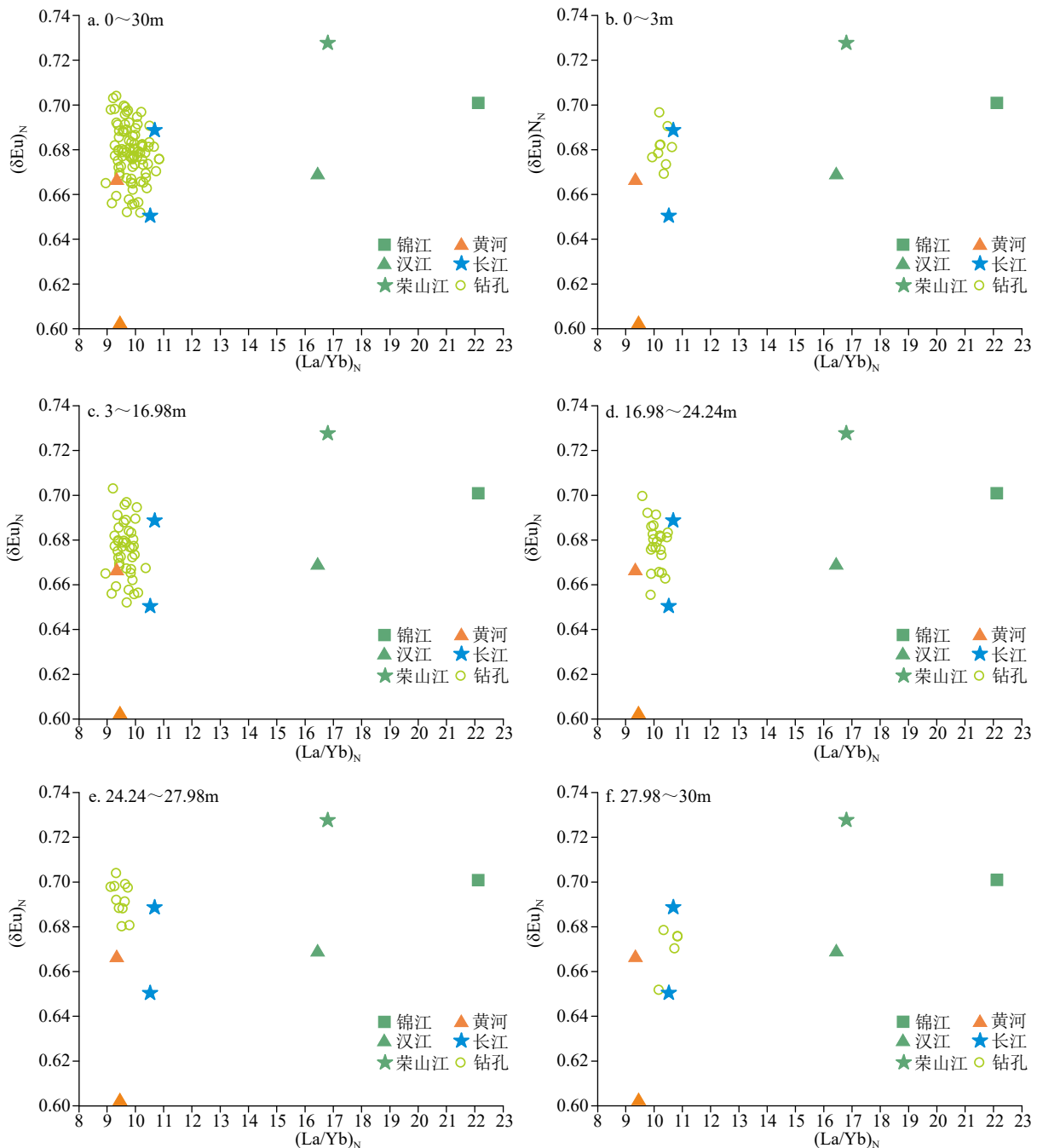


图 5 SYSC-1 孔不同层位沉积物 $(La/Yb)_N$ 与 $(\delta Eu)_N$ 投点判别物源图

Fig. 5 Source distribution plot of $(La/Yb)_N$ and $(\delta Eu)_N$ of core SYSC-1 sediments of different layers

判别样品与潜在物质来源河流沉积相关特征的接近程度^[20,47],可以有效区分黄河、长江沉积物物源属性。为了进一步研究 2 条河流沉积物对本钻孔的贡献,利用判别函数分析 SYSC-1 孔沉积物与黄河、长江沉积物的接近程度。DF 的计算公式如下:

$$DF = |X_{iz}X_{in}|/X_{in}$$

式中 X_{iz} 表示 SYSC-1 孔中元素 i 的质量分数或两元素质量分数比; X_{in} 表示黄河或长江沉积物中元素 i 的质量分数或两种元素的质量分数比值。DF 值越小表明物源相似度越高,通常 DF 值小于 0.5 时即被认为两种沉积物物源接近,尽可能选择化学性质相近的元素,而 REE 元素极为相似的属性特点完全满足判别函数(DF)计算条件。本次研究选取 La 和 Yb 作为判别元素,根据 La/Yb 计算了 SYSC-1 孔与黄河、长江沉积物的 DF 值,并分别用 DF_{hh} 和 DF_{cj} 表示,均值为 0.06 和 0.08,结果远小于 0.5,表明钻孔沉积物与黄河、长江沉积物相似,这与图 5 的结

果一致。为了进一步确定不同时期两条河输入物质在钻孔中的主导作用,已有学者通过计算判别函数(DF)差值的方法对物源进行了有效区分^[48]。在 0~3、16.98~24.24 和 27.98~30 m 段差值基本为正(图 6),表示长江输入物质占据优势;3~16.98 m 和 24.24~27.98 m 段差值基本为负,反映了黄河源物质占据主导地位。

南黄海西部陆架区钻孔沉积物的矿物学和地球化学证据显示,至少自中更新世以来,黄河沉积物就开始产生影响^[18],与此同时,长江三角洲沉积中心和河道系统已从苏北-南黄海盆地向南移动^[49],长江对南黄海的物源影响力开始逐渐减弱。根据测年数据建立的 SYSC-1 孔地层格架,0~30 m 段较完整地记录了中更新世晚期以来的物源演化过程。

物源判别函数(DF)的结果显示(图 6),SYSC-1 孔 27.98 m 左右记录了一次大的物源转换,沉积物由长江源(27.98~30 m)转为黄河源的物质(24.24~

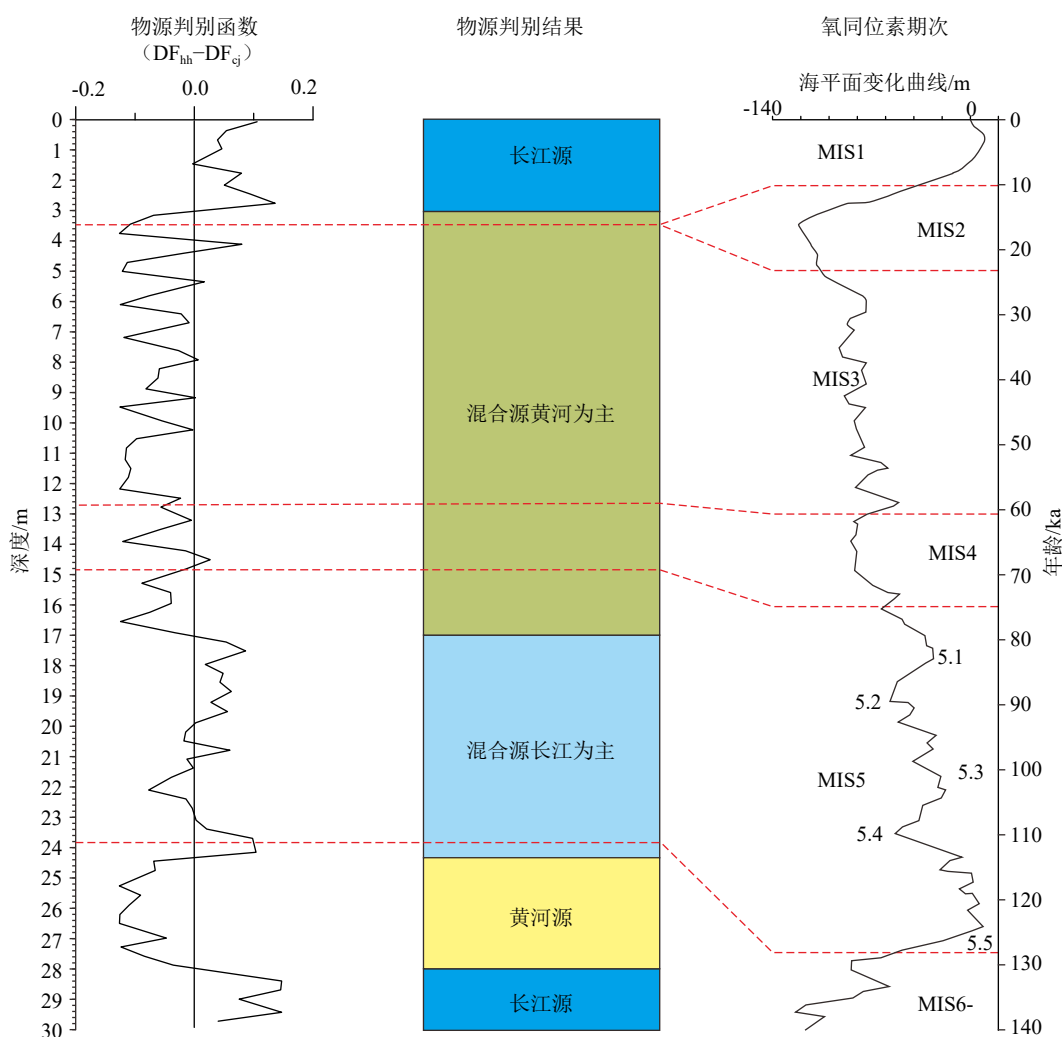


图 6 SYSC-1 孔沉积物 REE 判别函数 (DF) 物源区分图

Fig.6 Provenience determination by REE discriminant function (DF) of sediments in core SYSC-1

27.98 m)。24.24~30 m段沉积物颗粒相对较粗(平均粒径均值 6.61 Φ), 粒级由下而上发育了一个较完整的沉积旋回。从周边钻孔沉积环境来看, 南黄海西部 CSDP-1 孔该时期经历了河流相沉积环境^[24], 说明尽管自中更新世开始长江对黄海的影响逐渐降低^[16], 但 MIS6 期低海平面情况下古长江三角洲的物质依然能够运移到南黄海中部 36°N 附近。至 MIS6 期末期, 随着海侵的发生, 古长江河口开始后退, 黄河源沉积物开始大范围控制南黄海的沉积格局, 同时期位于南黄海南部的 NT2 孔也发育了黄河源沉积物^[37], 说明黄河源物质影响范围已向南延伸至 33°N 附近。

16.98~24.24 m 段的物源判别显示主要为长江源, 在 20~23 m 段内混入少量的黄河源物质。该层位相当于 MIS5.5 期至 MIS5.1 期发育的浅水陆架冷水团沉积, 沉积物以细颗粒为主(平均粒径均值 7.35 Φ), 且粒级基本没有变化。对比海平面变化曲线(图 6)可以发现 MIS5.5 时期海平面高度与现今相似或略低, 该时期黄海的浅海陆架区广泛发育了古黄海暖流^[50], 因此推测该时期黄河、长江入海口大幅退缩, 陆架可容纳空间迅速扩大, 黄河源的物质萎缩沉降在河口或近岸区域, 而浅海陆架区的长江源细颗粒沉积物被古黄海暖流由南往北携带而来, 并在冷涡区附近沉积下来。该层中还经历了 MIS5.4 期和 MIS5.2 期两个较短暂的低海平面时期, 推测混入少量黄河源物质的相应层位可能就是该时期的沉积物。

16.98~3 m 段的物源主要是黄河源, 在 4.2、5.2 和 14.6 m 左右混入少量的长江源物质。该层位相当于 MIS5.1 期至 MIS1 期发育的沉积, 沉积物相对以粗颗粒(平均粒径均值 6.21 Φ) 为主, 但由下而上, 粒级波动频繁且幅度较大, 反映该时期经历了比较动荡的沉积环境。该时期南黄海西部 CSDP-1 孔和 CSDP-2 孔也是发育一套以粉砂和黏土质粉砂为主的粗颗粒沉积物, 经历了河流相-滨岸相-三角洲相沉积环境^[24,35], 但 SYSC-1 孔所处位置水深更大, 由此推测 SYSC-1 孔很可能发育了一套滨浅海相-河口/潮坪相-三角洲相沉积。对比海平面变化曲线(图 6)可以发现, MIS5.1 期以后海平面明显下降(大部分时候比现今低 50~80 m 或以上), 陆架可容纳空间缩小, 导致黄河、长江入海口向陆架区移动。南黄海西部的浅剖资料解译显示, 在 MIS3 期时(海平面相对较高)南黄海西部和西南部陆架区广泛发育了黄河和长江古河道与古三角洲系统^[2]。位于黄海西部北侧主河道附近的 SYS-0701 和 SYS-

0803 孔, 岩芯中黏土矿物和轻、重矿物的物源分析表明 MIS3 层段期间的沉积物与黄河源物质具有可比性^[16], 表明北侧古河道在一定程度上可能与古黄河水系有关。而南侧主河道附近的 CSDP-1 孔的黏土矿物和同位素物源结果显示^[19], 在 MIS3 早中期, 古长江物源的主导地位, 说明南侧发育的是长江古河道或古三角洲。随着海退的发生, 古黄海暖流消失, 长江源的细颗粒物质已无法运移到钻孔附近, 仅能沉积在南黄海南部区域。

MIS1 期中晚期(3~0 m 段)以来, SYSC-1 孔沉积物再次转换为长江源的物质, 与 MIS5.5 期至 MIS5.1 期时的沉积非常相似, 沉积物以细颗粒为主(平均粒径均值 7.74 Φ), 且粒级几乎没有变化。结合海平面变化曲线来看, MIS1 期中后期海平面位置与现在相似, 相较于 MIS3 期时, 陆架区可容纳空间再度扩大, 黄河、长江入海口大幅后退, 超过一半的长江沉积物被困在河口内, 形成了一个大型三角洲^[51]; 剩余的沉积物沿浙闽沿海物源向南输送, 形成了东海内陆架的泥带^[52-53], 少部分向东南输送至济州岛西南部的泥质区和东海外陆架及冲绳海槽区^[54-55]。随着海平面的显著增高, 黄海暖流再次进入浅海陆架区, 将济州岛西南部泥质区的细颗粒物质搬运至 SYSC-1 孔附近的冷涡区沉积。此外, 自 8.5 ka 以来, 黄河主要向北流入渤海^[56], 泥沙量比目前低得多^[57]。同时, 山东半岛沿岸流的形成将黄河源沉积物主要控制在南黄海西部附近海域^[4,58], 对于物质大范围东扩起到阻碍作用, 因此 SYSC-1 孔周边区域并未发现黄河源的物质混入其中。

5 结论

(1) SYSC-1 孔 0~30 m 段沉积物中 $\sum\text{REE}$ 为 111.66~231.12 $\mu\text{g/g}$, 垂向分布变化较大, 均值为 189.35 $\mu\text{g/g}$, 与黄土 $\sum\text{REE}$ 均值 185.00 $\mu\text{g/g}$ 比较接近。 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La/Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\delta\text{Ce})_{\text{N}}$ 和 $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 等 REE 分异指数受粒级影响较小, 上陆壳标准化配分模式呈近似直线型展布, 与中国大陆河流(黄河和长江)沉积物 REE 标准化曲线比较相似。

(2) 海平面波动和海洋环流变化是 SYSC-1 孔物源转换的主要控制因素。根据 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 两个参数的物源归属区分发现, SYSC-1 孔 0~30 m 段的沉积物几乎不受朝鲜半岛河流的物源影响。根据 REE 判别函数(DF)的进一步物源分析来看, MIS6 期长江源物质(27.98~30 m)依然能够到达钻孔所在区域, 在 MIS6 期末期经历了一次大的物源

转换,沉积物由长江源转为黄河源(24.24~27.98 m)的物质。MIS5.5 期至 MIS5.1 期发育了一套浅水陆架冷水团沉积,主要是长江源细颗粒沉积物被古黄海暖流由南往北携带而来,并在冷涡区附近沉积下来。MIS5.1 期至 MIS1 期,主要发育了一套滨浅海相-河口/潮坪相-三角洲相沉积,随着陆架可容纳空间缩小,导致黄河、长江入海口向陆架区移动,黄河源物质控制了钻孔所处的南黄海北部区域。MIS1 期中晚期,山东半岛沿岸流的形成将黄河源物质主要控制在南黄海西部附近海域,而黄海暖流将济州岛西南部泥质区的长江源细颗粒物质搬运至 SYSC-1 孔附近的冷涡区沉积下来。

致谢: 感谢自然资源部国际合作司给予了项目资助和支持,感谢审稿专家的评审意见,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [2] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278 (1-4): 54-76.
- [3] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63 (1-2): 93-120.
- [4] 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]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34 (1): 109-119.]
- [5] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209 (1-4): 45-67.
- [6] Yang S Y, Youn J S. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central South Yellow Sea sediments [J]. *Marine Geology*, 2007, 243 (1-4): 229-241.
- [7] Gao X B, Ou J, Guo S Q, et al. Sedimentary history of the coastal plain of the south Yellow Sea since 5.1 Ma constrained by high-resolution magnetostratigraphy of onshore borehole core GZK01 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 239: 106355.
- [8] 杨子庚. Olduvai 亚时以来南黄海沉积层序及古地理变迁[J]. 地质学报, 1993, 67 (4): 357-366. [YANG Zigeng. The sedimentary sequence and palaeogeographic changes of the South Yellow Sea since the Olduvai subchron [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67 (4): 357-366.]
- [9] Lee H J, Chough S K. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1989, 87 (2-4): 195-205.
- [10] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-289. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. *Geology in the Yellow Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-289.]
- [11] Lee H J, Chu Y S. Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea: Huksan mud belt [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71 (1): 144-154.
- [12] 赵一阳, 李凤业, 秦朝阳, 等. 试论南黄海中部泥的物源及成因[J]. 地球化学, 1991, 20 (2): 112-117. [ZHAO Yiyang, LI Fengye, QIN Zhao yang, et al. Source and genesis of mud in the central part of the South Yellow Sea in special reference to geochemical data [J]. *Geochimica*, 1991, 20 (2): 112-117.]
- [13] Chough S K, Kwon S T, Ree J H, et al. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52 (1-3): 175-235.
- [14] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240 (1-4): 169-176.
- [15] Dong L X, Guan W B, Chen Q, et al. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93 (3): 248-258.
- [16] Zhang J Q, Liu J, Wang H X, et al. Characteristics and provenance implication of detrital minerals since Marine Isotope Stage 3 in Core SYS-0701 in the western South Huanghai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32 (4): 49-58.
- [17] Pico T, Mitrovica J X, Ferrier K L, et al. Global ice volume during MIS 3 inferred from a sea-level analysis of sedimentary core records in the Yellow River Delta [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 152: 72-79.
- [18] Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: Tectonic or climate forcing? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 216: 74-88.
- [19] Huang J, Wan S M, Zhang J, et al. Mineralogical and isotopic evidence for the sediment provenance of the western South Yellow Sea since MIS 3 and implications for paleoenvironmental evolution [J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 103-117.
- [20] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南黄海 NT1 孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. 地球化学, 2009, 38 (2): 123-132. [LAN Xianhong, ZHANG Xianjun, ZHAO Guangtao, et al. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination [J]. *Geochimica*, 2009, 38 (2): 123-132.]
- [21] Sun Z Y, Li G, Yin Y. The Yangtze River deposition in southern Yellow Sea during marine oxygen isotope stage 3 and its implications for sea-level changes [J]. *Quaternary Research*, 2015, 83 (1): 204-215.
- [22] Su M, Yao P, Wang Z B, et al. Exploratory morphodynamic hindcast of the evolution of the abandoned Yellow River delta, 1578-1855 CE [J]. *Marine Geology*, 2017, 383: 99-119.
- [23] 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*, 2018, 177: 478-496.
- [24] 王中波, 张江勇, 梅西, 等. 中国陆架海MIS5(74~128 ka)以来地层及其沉积环境[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1370-1394. [WANG Zhongbo, ZHANG Jiangyong, MEI Xi, et al. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5(74-128)ka [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1370-1394.]
- [25] 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.]
- [26] 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.]
- [27] 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 elements in continental shelf sediments of the China Seas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(1): 37-43.]
- [28] 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.]
- [29] 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.]
- [30] 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): 303-313. [WU Mingqing. REE geochemistry of sea-floor sediments from the Taiwan shallow, China [J]. *Geochimica*, 1983, 30(3): 303-313.]
- [31] 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, 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.]
- [32] 管秉贤. 黄、东海浅海水文学的主要特征[J]. *黄渤海海洋*, 1985, 3(4): 1-10. [GUAN Bingxian. Major features of the shallow water hydrography in the East China Sea and Huanghai Sea [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1985, 3(4): 1-10.]
- [33] Wang W J, Jiang W S. Study on the seasonal variation of the suspended sediment distribution and transportation in the East China Seas based on SeaWiFS data [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2008, 7(4): 385-392.
- [34] Pang Y M, Guo X W, Han Z Z, et al. Mesozoic-Cenozoic denudation and thermal history in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin and the implications for hydrocarbon systems: constraints from the CSDP-2 borehole [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 355-369.
- [35] 刘健, 段宗奇, 梅西, 等. 南黄海中部隆起晚新近纪: 第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 25-43. [LIU Jian, DUAN Zongqi, MEI Xi, et al. Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 25-43.]
- [36] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 南黄海NT2孔沉积物物源研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1182-1189. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Provenance study of sediments in core NT2 of the South Yellow Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1182-1189.]
- [37] 王飞飞, 张勇, 仇建东, 等. 山东半岛南部近岸海域晚第四纪以来有孔虫和介形类化石群落分布特征及古环境演化[J]. *微体古生物学报*, 2014, 31(2): 130-146. [WANG Feifei, ZHANG Yong, QIU Jiandong, et al. Late quaternary distribution characters of foraminifera and ostracoda in the offshore area of Southern Shandong Peninsula and paleoenvironmental evolution [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2014, 31(2): 130-146.]
- [38] Lai Z P. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(1): 9-16.
- [39] 杨子庚, 林和茂, 王圣洁, 等. 对末次间冰期南黄海古冷水团沉积的探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(1): 48-55, 57-59. [YANG Zigeng, LIN Hemaoy, WANG Shengjie, et al. A study of the ancient Cold Water Mass sediments in South Yellow Sea during Last Interglacial [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(1): 48-55, 57-59.]
- [40] 杨守业, 李从先, Lee C B, 等. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及沉积物物源示踪[J]. *科学通报*, 2003, 48(11): 1135-1139. [YANG Shouye, LI Congxian, Lee C B, et al. REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1135-1139.]
- [41] Masuda A, Nakamura N, Tanaka T. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(2): 239-248.
- [42] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Melbourne: Blackwell, 1985: 29-45.
- [43] 乔淑卿, 杨作升. 长江和黄河入海沉积物不同粒级组分中稀土元素的比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(6): 9-16. [QIAO Shuqing, YANG Zuosheng. Comparison of rare earth element compositions in different grain-size fractions of sediments from the Yangtze and Yellow Rivers and the sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(6): 9-16.]
- [44] Yang S Y, Jung H S, Li C X. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1-2): 19-34.
- [45] Holser W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 132(1-4): 309-323.
- [46] Condie K C. Another look at rare earth elements in shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.

- [47] 李双林, 李绍全. 黄海YA01孔沉积物稀土元素组成与源区示踪[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(3): 51-56. [LI Shuanglin, LI Shaoquan. REE composition and source tracing of sediments from core YA01 in Yellow Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(3): 51-56.]
- [48] 王忠蕾, 梅西, 郑洪波, 等. 辽东湾北部JXC-1孔稀土元素组成与物源判别[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(1): 28-42. [WANG Zhonglei, MEI Xi, ZHENG Hongbo, et al. Rare earth element compositions and provenance of sediments from core JXC-1 in the northern Liaodong Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(1): 28-42.]
- [49] 黎兵, 魏子新, 李晓, 等. 长江三角洲第四纪沉积记录与古环境响应[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 316-328. [LI Bing, WEI Zixin, LI Xiao, et al. Records from quaternary sediment and palaeo-environment in the Yangtze River delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 316-328.]
- [50] 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]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 442: 48-60.
- [51] Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Evolution of the coastal depositional systems of the Changjiang (Yangtze) River in response to Late Pleistocene-Holocene sea-level changes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(6): 884-897.
- [52] 黄龙, 张志珣, 耿威, 等. 闽浙沿岸东部海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 161-169. [HUANG Long, ZHANG Zhixun, GENG Wei, et al. Grain size of surface sediments in the Eastern Min-Zhe Coast: an indicator of sedimentary environments [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014, 34(6): 161-169.]
- [53] Li J, Hu B Q, Wei H L, et al. Provenance variations in the Holocene deposits from the southern Yellow Sea: clay mineralogy evidence [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 41-51.
- [54] Hu B Q, Yang Z S, Qiao S Q, et al. Holocene shifts in riverine fine-grained sediment supply to the East China Sea Distal Mud in response to climate change [J]. *The Holocene*, 2014, 24(10): 1253-1268.
- [55] 黄龙, 王中波, 耿威, 等. 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物来源及输运[J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2722-2734. [HUANG Long, WANG Zhongbo, GENG Wei, et al. Sources and transport of clay minerals in surface sediments of the Northeastern East China Sea [J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2722-2734.]
- [56] 薛春汀, 周永青, 朱雄华. 晚更新世末至公元前7世纪的黄河流向和黄河三角洲[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 48-61. [XUE Chunting, ZHOU Yongqing, ZHU Xionghua. The Huanghe River course and delta from end of late Pleistocene to the 7th Century BC [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 48-61.]
- [57] Saito Y, Yang Z S, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene [J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2-3): 219-231.
- [58] 密蓓蓓, 张勇, 梅西, 等. 中国东部海域表层沉积物稀土元素赋存特征及物源探讨[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1530-1541. [MI Beibei, ZHANG Yong, MEI Xi, et al. The rare earth element content in surface sediments of coastal areas in eastern China's sea areas and an analysis of material sources [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1530-1541.]