

吴淑玉, 刘俊, 冯永财, 等. 2 ka 以来山东半岛北部海域泥楔的稀土元素特征及物源识别[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 2-14.

WU Shuyu, LIU Jun, FENG Yongcai, et al. Characteristics and provenance of rare earth element in mud wedge in the sea area north of Shandong Peninsula since 2 ka[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 2-14.

2 ka 以来山东半岛北部海域泥楔的稀土元素特征及物源识别

吴淑玉^{1,2,3,4,5}, 刘俊^{1,5*}, 冯永财¹, 常青¹, 李佳林¹, 远继东¹, 李梦婷¹, 宁伏龙², 刘昌岭⁵, 宋轩⁶

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000; 2 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 3 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012; 4 中国地质科学院, 北京 100037; 5 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 6 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590)

摘要: 山东半岛泥楔是连接渤海和黄海的关键沉积体, 在中国海域的沉积体系中占有重要地位, 也是中国陆架边缘重要的“源-汇”体系中不可或缺的一环。通过分析位于山东半岛北部海域泥楔 ZZ04 柱状样的 AMS ¹⁴C 测年、沉积物粒度以及稀土元素含量等, 探讨研究区稀土元素的控制因素以及泥楔沉积物的来源。结果表明, ZZ04 柱状样的沉积物类型以粉砂为主, 物质组分相对单一, 在剖面上, 粒度自下而上呈现由细至粗的变化过程。稀土元素经球粒陨石标准化后, 显示出轻稀土富集而重稀土相对稳定的右倾“V”字型特征, 为明显的陆源型特征。进一步将 ZZ04 与周围河流的稀土元素进行上陆壳标准化后对比分析可知, ZZ04 与黄河的配分曲线较为相似, 而与韩国河流以及山东半岛河流的配分曲线差异较大。此外, 通过对稀土元素与粒度进行相关性分析, 结合两者曲线的对比分析发现, 2 ka 以来, 山东半岛泥楔的稀土元素分布受“粒度效应”的影响, 泥楔的物源主要来自黄河。在现代海洋环流体系建立后, 黄河携带的细粒沉积物沿着山东半岛北部沿岸流向东穿过渤海海峡进入黄海。在此过程中受到由南向北的黄海暖流的顶托作用, 流速降低, 导致大量细颗粒物在山东半岛北部海域沉积, 并形成“Ω”型的独特水下三角洲。

关键词: 山东半岛; 粒度; 稀土元素; 泥楔; 物源

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.126

0 引言

中国陆架边缘海的泥质区, 其沉积物具有物源

收稿日期: 2024-05-24

资助项目: 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金“2.28 Ma 年以来渤海西部古河道时空分布及有机碳埋藏成因研究”(KC20220011); 自然资源部海底科学重点实验室开放基金“南黄海盆地中部隆起石炭纪—早二叠世非均质孔隙型碳酸盐岩储层刻画技术及油气潜力分析”(KLSG2304); 中国地质调查局项目“1:25 万威海幅海洋区域地质调查”(DD20230412), “渤海近海海域海岸带自然资源综合调查”(DD20230073), “渤海曹妃甸海域 1:5 万海洋区域地质调查”(DZ20220602)

第一作者: 吴淑玉(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震资料解释和地质综合分析方面的研究工作。E-mail: hnwshuyu@163.com

* 通讯作者: 刘俊(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地球物理和海洋地质方面的研究工作。E-mail: vnjl@163.com

广泛、沉积速率高、环境信息丰富和对气候变化敏感等特点, 是全球气候与环境变化的理想记录器。20 世纪 80 年代, MILLIMAN 等^[1]首次在山东半岛北部发现一个向海延伸的“山东半岛泥质楔”, 距离现代黄河口约 350 km。ALEXANDER 等^[2]进一步指出, 该泥楔的位置与黄河入海泥沙穿过渤海经北黄海向南黄海传输的路径相吻合, 并认为其形成时间介于 6.2~4 ka。LIU 等^[3]将其命名为“水下三角洲”, 并通过高分辨率浅剖地震解释, 将其划分为近岸相和远端相, 近岸相的形成时间约在 11~9.2 ka BP, 远端相则从 9.2 ka BP 直到现今。山东泥楔厚度可达 40 m, 向东逐渐减薄, 并在 123°10'E 处尖灭而消失。这一楔形沉积体的形成, 是由于黄河携带的细粒物质绕过山东半岛, 沿着山东海岸向南流动, 形成了独特的“Ω”型地貌特征^[4-5]。

众多学者对山东半岛泥楔的物源进行了大量的研究, 泥楔的细粒级泥质沉积通常被认为是现代沉积, 但也有观点认为它们是残留沉积。例如李国刚^[6]认为这些沉积物是陆架上的“残留泥”, 而赵松龄等^[7]进一步提出, 这些沉积物可能是晚更新世陆架沙漠化时期形成的衍生沉积。然而, 通过对山东半岛北部泥楔沉积体的不同部位进行²¹⁰Pb 测年和 AMS ¹⁴C 测年, 可以确认这些沉积物属于现代沉积。HU 等^[8]提出了上升流对泥质沉积体的影响, 认为北黄海泥质区、南黄海中部泥质区以及东海北部泥质区的形成与上升流密切相关。程鹏等^[9]指出, 山东半岛北侧的沉积物具有向东和东北方向的运输趋势, 西部沉积物的运输趋势向东南, 随后转向东, 北部沉积物的运输趋势则向南, 形成了向北黄海中部汇聚的模式。北黄海中部泥质区的地球化学和黏土矿物特征显示, 这是一个多源泥质沉积区, 其物源包括山东沿岸流物质(黄河物质)、辽东半岛河流物质、黄海暖流物质(南黄海物质)以及大气降尘。然而, 从各物源对中部泥质区的贡献来看, 黄河物质是主要的物源。

稀土元素由于其化学性质的近似性和稳定性, 在母岩的风化、剥蚀、搬运、沉积过程中不易发生迁移, 主要受母岩成分、形成过程和气候环境所控制, 因此能够反映源岩的信息^[10-11]。稀土元素的应用在沉积物来源、物源区特性和气候环境研究领域日益广泛^[12-13]。近年来, 众多学者对渤海、黄海、东海和南海等海域, 以及黄河、长江等地区的沉积物进行了深入的稀土元素地球化学特征、分布和控制因素研究, 利用稀土元素的丰度、分布特征、配分模式和比值等参数, 有效地揭示了沉积物的来源、形成条件和控制因素^[11,14-20]。本文基于 ZZ04 柱状样的 AMS ¹⁴C、粒度分析和稀土元素的地球化学特征, 深入探讨山东半岛泥楔的物质来源以及稀土元素的控制因素。

1 地质背景

北黄海位于辽东半岛、山东半岛和朝鲜半岛之间, 其地理位置大致为 37°20'—39°50'N、121°00'—125°10'E, 是一个向东南方向敞开的箕状洼地, 属于浅海大陆架^[21-22]。北黄海的平均水深 38 m, 最大水深可达 80 m。北部地区为倾斜的浅海平原, 海底地形自北向南逐渐倾斜, 中部则存在一个相对较深的

洼地^[23]。北黄海周缘散布有众多岛屿, 包括北部的长山列岛、石城列岛及獐子岛等, 西部沿南北走向分布的庙岛列岛, 山东半岛北部陆架沿岸分布的成山岛、养马岛、刘公岛等, 以及朝鲜半岛西海岸的白翎岛、大青岛、小青岛、陆岛等。

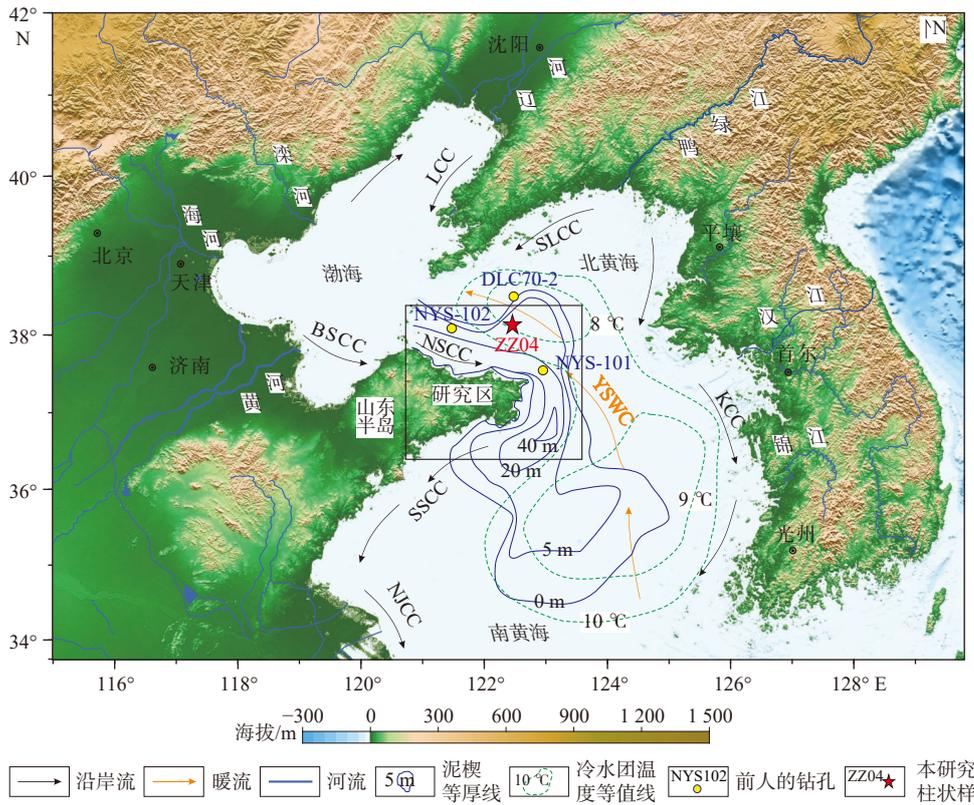
北黄海大部分海域属于正规半日潮, 仅成山头以东至朝鲜半岛大青岛一带为不规则半日潮。北黄海潮差分布西岸最大潮差 < 3 m, 成山头附近海域潮差 < 2 m, 东岸最大潮差普遍 > 4~5 m, 尤其西朝鲜湾海域, 潮差可达 8~10 m。北黄海潮流流速近岸海域较大, 辽东半岛东南近岸流速为 60~100 cm/s, 西朝鲜湾海域可达 120 cm/s, 而山东半岛北部近岸海域为弱流区, 流速 < 20 cm/s。黄海暖流流向终年向北, 冬强夏弱, 流速一般为 5~10 cm/s。冬季, 黄海暖流北上进入北黄海, 在北黄海向东、西各有 1 条分支分别与西朝鲜沿岸流和黄海沿岸流汇合, 后逐渐偏西, 其延伸部分可进入渤海。夏季, 由于南黄海冷水南向入侵, 黄海暖流受阻向北仅至 35°N 附近。

2 材料与方法

ZZ04 柱状样是由中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心于 2023 年利用“海洋地质七号”船在山东半岛北部海域(37.963 203°N、122.370 869°E, 图 1)通过振动取样器取得。其水深为 44.2 m, 岩芯长度为 3.3 m, 岩性主要由灰色粉砂质黏土和黏土质粉砂组成。为了确保测试的一致性, 研究团队还在黄河口附近采集了 5 个样品进行同步测试分析。岩芯样品在实验室按照 2 cm 的等厚度标准进行切样。粒度分析和稀土元素测试分别以 2 cm 和 4 cm 的间隔进行取样。为了构建本研究区的年代格架, 通过挑取底栖有孔虫样品进行 AMS ¹⁴C 测年。粒度分析和稀土元素化学测试均在烟台海岸带地质调查中心实验室完成。

粒度分析的具体步骤和方法已在文献[24]中详细描述。本研究采用美国安东帕公司生产的 PSA 1190LD 型激光粒度分析仪进行粒度测试, 该设备测量范围 0.98~2500 μm, 且其重复测量的相对误差控制在 1% 以内。另外根据 FOLK 和 WARD^[25]所提出的公式, 计算了沉积物的平均粒径、分选系数、峰度和偏度等参数。

在沉积物稀土元素测试之前, 先将样品在 110 °C 下干燥 5 h, 随后进行冷却。样品的溶解过程运用



研究区主要海流包括：辽宁沿岸流(LCC)，渤海沿岸流(BSCC)，山东半岛北部沿岸流(NSCC)，山东半岛南部沿岸流(SSCC)，江苏北部沿岸流(NJCC)，黄海暖流(YSWC)，韩国沿岸流(KCC)；地理位置简称：渤海海峡-B.S.，北黄海-NYS，南黄海-SYS；NYS101、NYS102 钻孔引自文献 [5,26]，DLC70-2 钻孔引自文献 [27-28]

图1 研究区钻孔位置、泥楔等厚线与冷水团等值线及环流格局示意图

Fig.1 Locations of the boxcore sampling in the study area, isopach of mud wedges, isopleths of cold water masses, and circulation patterns

两步酸融法，具体操作过程为：首先使用 4 mL HNO₃ 和 1 mL HClO₄ 的混合溶液，接着使用 4 mL HF 和 1 mL HClO₄ 的混合溶液进行溶解，持续进行这一过程，直到溶解液中不再出现黑色或白色残渣为止。溶解完成后，用 10 mL HNO₃ 进行提取，随后使用德国赛默飞公司生产的 iCAP-Q 型号电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对样品中的稀土元素进行测定。测定的稀土元素包括：La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y 共 15 种。这些稀土元素中，前 6 种元素被称为轻稀土元素(LREE)，后 9 种元素则被称为重稀土元素(HREE)。

AMS¹⁴C 测年工作是在中国地质科学院水文地

质环境地质研究所完成，测试所用加速器质谱仪为美国 NEC 公司生产的 0.5 MV 1.5SDH-1 型加速器质谱仪，¹⁴C/¹²C 的比率测量精度优于 3‰。此外该设备具有极低的本底值， $F_m=0.0004$ (相当于 63 764 a 的放射性碳年龄)。测试方法采用了 Zn/Fe 火焰封管-加速器质谱法。具体步骤为：①通过燃烧法将样品中的碳转化为二氧化碳；②利用锌铁法将二氧化碳转化为石墨；③使用加速器质谱仪测定 AMS¹⁴C 的放射性比度，进而计算出样品的年龄。针对北黄海地区的样品，采用了 $\Delta R=-276 \pm 52 \text{ a}^{[29]}$ 的校正值，并使用 CALIB 7.0.2 版本^[30] 进行年代校正。AMS¹⁴C 测年结果如表 1 所示。

表 1 ZZ04 柱状样的 AMS¹⁴C 测年数据

Table 1 AMS¹⁴C dating data of the Core ZZ04 sample

样品编号	采样深度/cm	材料	现代碳比值 F_m 值	¹⁴ C年龄/a BP	$\Delta^{14}\text{C}/\text{‰}$	校正年龄/cal a BP	1 σ
ZZ04-135	134	混合底栖有孔虫	0.7985 ± 0.0030	1 810 ± 35	-208.5 ± 3.0	1 487	1 385~1 576
ZZ04-315	314	混合底栖有孔虫	0.7558 ± 0.0025	2 250 ± 30	-250.9 ± 2.5	2 016	1 911~2 119

注：现代碳比值 F_m 值是指样本中¹⁴C/¹²C比例与当前大气中¹⁴C/¹²C比例的比值；1 σ 是指AMS¹⁴C测年的1个标准差，表示测量结果的可信区间。

3 结果与讨论

3.1 沉积物粒度特征

沉积物主要由粉砂组成, 平均含量为 77.94%, 分布范围为 75.7%~81.09% (图 2b); 其次为黏土, 平均含量 21.64%, 分布范围为 17.88%~24.19% (图 2c); 砂的含量极低, <1.5% (图 2a)。根据粒径曲线的分布特征, 在 1.83 m 深度处划分成 2 个深度段, 根据 AMS ^{14}C 测年(表 1)插值, 该深度对应的年代为 1630 cal a BP。下段 1.83~3.37 m, 岩性为灰色粉砂质黏土, 粒度从下到上由粗变细。在岩性组分上, 粉砂含量较高(图 2a—c), Shepard 分类岩性三元图显示沉积物以粉砂为主(图 2i), 从下到上, 粉砂含量逐渐减少, 而黏土含量相应增加(图 2b、c)。平均粒径从 6.63 Φ 增加到 6.87 Φ , 属于中等粒径范

围(图 2d), 呈现单峰分布且较集中, 主峰众数为 6 Φ (图 2h)。分选系数和偏态曲线变化相对稳定, 分选系数在 1.55 附近波动, 偏态在 0.15 附近波动, 表明沉积物具有中等分选和正偏特性(图 2e—f)。峰态从 0.96 增加到 0.99, 呈现整体增加趋势(图 2g), 这表明粒度逐渐变细, 水动力作用减弱。上段 0~1.83 m 为灰色黏土质粉砂, 从下到上粒度逐渐变粗, 以粉砂含量为主且呈增加趋势, 从 76% 增加到 81%(图 2b), 平均粒径从 6.87 Φ 减小到 6.46 Φ , 同样属于中等粒径范围(图 2d)。粒径分布主要呈现单峰形态, 且比较集中, 主峰众数为 5 Φ ~6 Φ (图 2h)。分选系数的变化显示了从差变好的分选过程(图 2e)。偏态在 1~1.83 m 出现剧烈变化, 而 1 m 之上则呈现持续上升的趋势(图 2f)。整个柱状样品的粒径概率曲线为两段式特征, 主要由悬浮组分构成, 少部分为跃移组分, C-M 图显示粒径介于海洋悬浮和均匀悬浮之间(图 2j)。

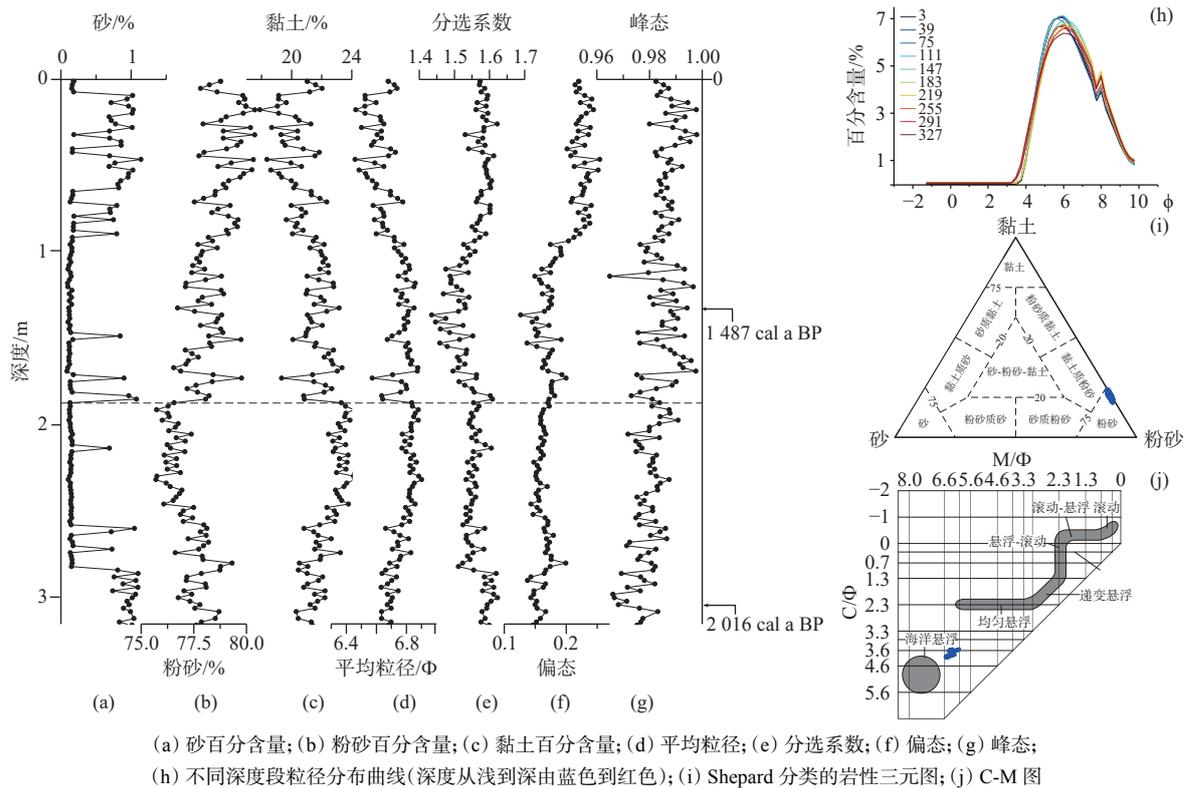


图 2 ZZ04 柱状样的粒度曲线及沉积动力图解

Fig. 2 Grain size curves and the charts of sediment dynamics of the Core ZZ04 sample

3.2 稀土元素含量特征

3.2.1 稀土元素总体特征

ZZ04 柱状样沉积物稀土元素含量(不包括元素 Y)见表 2, 其垂向变化见图 3、4。所有稀土元素

在沉积物中的分布模式呈现出高度的一致性。总稀土含量 ΣREE 含量变化范围为 107.64~179 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 146.13 $\mu\text{g/g}$ 。这一数值接近全球沉积物 ΣREE 平均值(150~300 $\mu\text{g/g}$)的低值端, 低于中国陆架海(154.77 $\mu\text{g/g}$)、南海(166.26 $\mu\text{g/g}$)和渤海

表 2 研究区柱状样、中国陆架海以及河流沉积物中稀土元素的丰度
Table 2 Abundance of rare earth elements in Core ZZ04 samples from the study area, Chinese continental shelf, and river sediments

	$\Sigma REE/(\mu g/g)$	$\Sigma LREE/(\mu g/g)$	$\Sigma HREE/(\mu g/g)$	$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$(\delta Eu)_N$	$(\delta Ce)_N$	数据来源
ZZ04	146.13	130.38	16.13	8.065	8.60	2.93	1.73	0.54	1.12	本研究
分布范围	107.64~179	92.4~161.21	14.79~17.83	6.06~9.49	6.84~10.57	2.54~3.39	1.57~1.93	0.52~0.56	0.72~1.45	本研究
渤海	209.69	182.20	27.49	6.63	13.63	3.73	2.79	0.76	0.85	文献[31]
黄海	122.98	111.59	11.39	9.80	10.02	3.87	2.10	0.71	1.11	文献[31]
东海	120.13	107.25	12.88	8.33	8.83	3.01	2.17	0.60	1.15	文献[31]
南海	166.26	152.14	14.12	10.77	21.25	5.48	2.93	0.72	0.63	文献[31]
中国陆架海	154.77	138.30	16.47	8.88	13.44	4.02	2.50	0.70	0.94	文献[31]
黄河	189.95	170.01	19.94	8.42	8.19	3.20	1.75	0.56	1.13	本研究
分布范围	143.61~262.55	127.4~238.39	16.21~24.16	7.86~9.87	6.95~10.55	2.78~3.71	1.59~1.97	0.49~0.63	1.05~1.23	本研究
山东半岛河流	130.96	119.85	11.11	10.88	11.73	4.45	1.71	0.73	1.06	文献[32]
分布范围	120.33~142.04	110.36~128.98	9.86~13.06	9.88~11.56	9.84~12.86	4.02~4.85	1.59~1.85	0.7~0.76	1.02~1.1	文献[32]
长江	211.11	193.19	17.92	10.77	14.78	5.23	1.91	0.75	0.94	文献[33]
分布范围	186.96~224.5	170.58~205.6	16.38~18.9	10.41~11.15	14.25~15.21	5.17~5.26	1.9~1.94	0.74~0.76	0.94~0.95	文献[33]
鸭绿江	232.66	211.49	21.17	9.99	11.15	4.22	1.72	0.65	1.13	文献[33]
分布范围	219.1~246.21	198.21~224.77	20.89~21.44	9.49~10.48	10.44~11.86	4.19~4.24	1.65~1.79	0.64~0.66	1.13~1.14	文献[33]
汉江	305.19	287.17	18.02	15.94	25.53	6.25	2.48	0.68	1.09	文献[33]
分布范围	292.28~330.37	273.41~311.69	16.53~18.87	14.49~16.72	22.73~27.89	6.04~6.4	2.34~2.63	0.65~0.71	1.07~1.11	文献[33]
锦江	236.61	221.48	15.13	14.64	22.12	5.47	2.36	0.68	1.00	文献[33]
分布范围	190.2~283.37	176.53~266.62	13.67~16.75	12.91~15.92	18.85~24.21	5.11~5.63	2.17~2.48	0.67~0.69	0.97~1.04	文献[33]

注: 稀土元素统计值为La—Lu等15个值, 不统计Y的值, 分异系数经过球粒陨石标准化^[34]; N为样品数量。

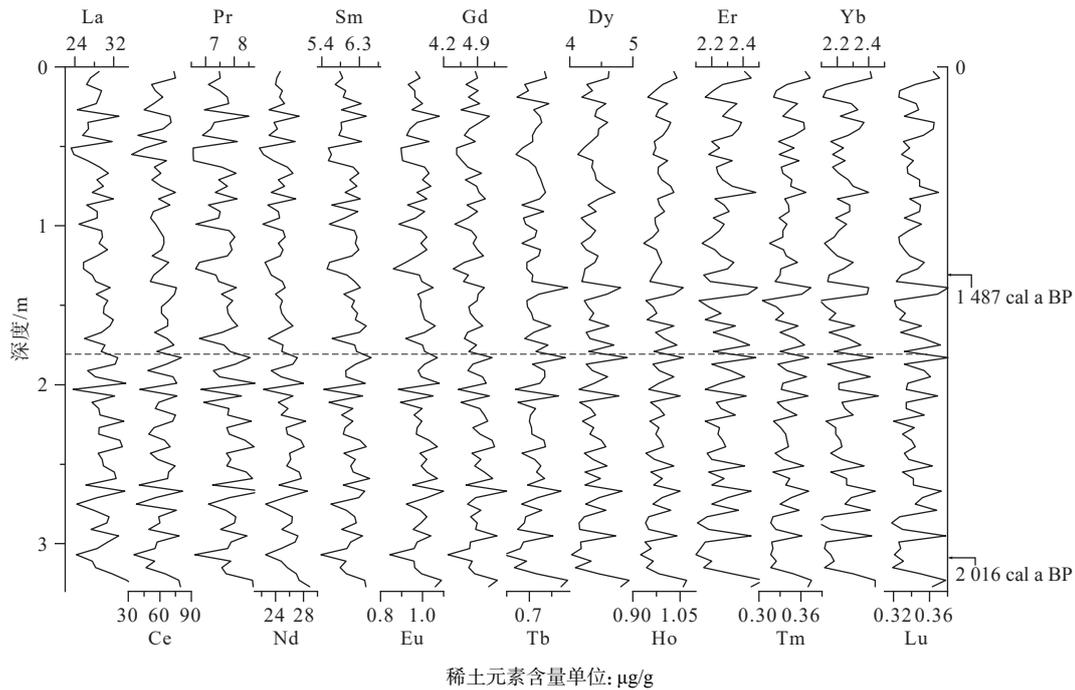
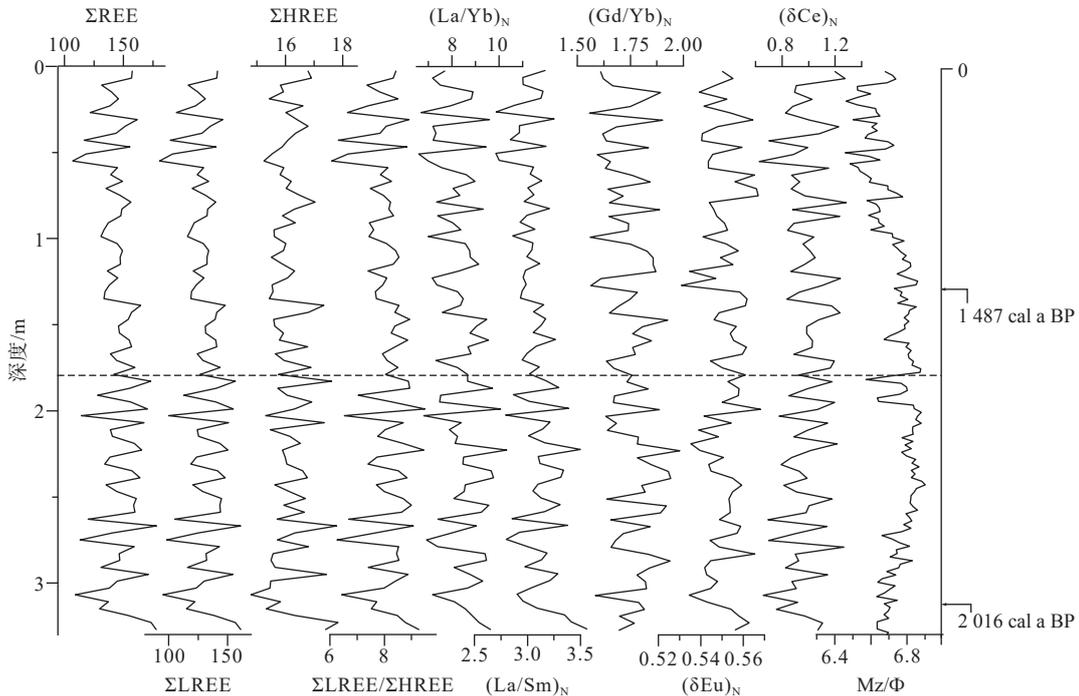


图 3 ZZ04 柱状样的单稀土元素丰度变化曲线

Fig.3 The variation curves of rare earth element abundance of the Core ZZ04 sample



ΣREE、ΣLREE 和 ΣHREE 单位: μg/g; (La/Yb)_N、(Gd/Yb)_N、(La/Sm)_N、(δEu)_N 和 (δCe)_N 指经过球粒陨石标准化^[34]

图 4 ZZ04 柱状样的稀土元素统计和比值变化曲线

Fig.4 Statistical and ratio variation curves of rare earth elements in the Core ZZ04 sample

(209.69 μg/g) 的沉积物平均值^[31], 略高于黄海 (122.98 μg/g) 和东海 (120.13 μg/g) 的平均值^[35]。相对于周围河流, 该含量低于黄河 (189.95 μg/g)、长江 (211.11 μg/g)、鸭绿江 (232.66 μg/g)、汉江 (305.19 μg/g) 以及锦江 (236.61 μg/g) 沉积物的平

均值^[33], 但高于山东半岛河流 (130.96 μg/g) 沉积物的平均值。

同样稀土元素含量的变化曲线按照 1.83 m 深度分为 2 段, 其中, 下段稀土元素含量比上段略高, 且呈现剧烈抖动但相对稳定的波动, 相比之下, 上

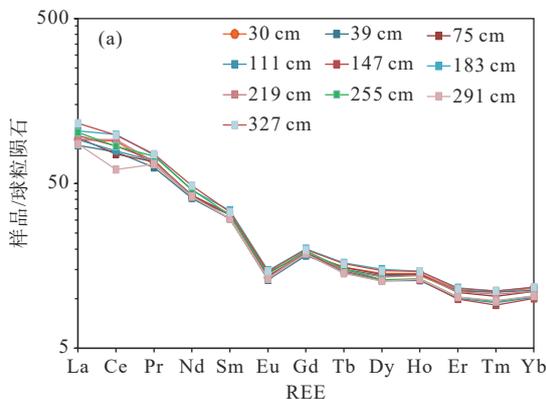
段则呈现微弱的衰减趋势(图3)。ZZ04柱状样的轻稀土元素 Σ LREE变化范围为92.4~161.21 $\mu\text{g/g}$, 平均值为130 $\mu\text{g/g}$, 约占总稀土含量的89%, 相对较富集。重稀土元素 Σ HREE变化范围为14.79~17.83 $\mu\text{g/g}$, 平均值为16.13 $\mu\text{g/g}$, 约占总稀土含量的11%, 相对亏损(表2)。 Σ LREE/ Σ HREE平均值为8.065, 其分布范围为6.06~9.49, 这一比值与中国陆架海以及黄河比较相近(表2), 反映了研究区陆源沉积物的来源特征。

3.2.2 稀土元素的分馏特征

稀土元素的分馏参数对于理解沉积物的来源和沉积环境具有重要意义。其中, $(\text{La/Yb})_N$ 、 $(\text{La/Sm})_N$ 和 $(\text{Gd/Yb})_N$ 是稀土元素的3个重要分馏参数, $(\text{La/Yb})_N$ 代表LREE和HREE之间的分馏, 其值越大说明LREE越富集。 $(\text{La/Sm})_N$ 为轻稀土内部分馏差异, $(\text{Gd/Yb})_N$ 为重稀土内部分馏差异, 两者的值越大说明LREE和HREE内部分异性越明显^[36]。在ZZ04柱状样品中, $(\text{La/Yb})_N$ 的变化范围为6.84~10.57, 平均值为8.6, 这表明LREE和HREE之间存在较为明显的分异。 $(\text{La/Sm})_N$ 的变化范围为2.54~3.39, 平均值为2.93, 而 $(\text{Gd/Yb})_N$ 的变化范围为1.57~1.93, 平均值为1.73(表2)。这3个分馏参数在曲线上的变化趋势相似, 总体变化范围不大, 分别在8、3和1.75的数值小幅度波动。在柱状样品的下段, 这些参数的变化相对稳定, 而上段则表现出微弱的衰减趋势, 这与 Σ REE曲线的变化趋势相一致(图4)。

此外, δEu 和 δCe 异常值也是重要的环境分馏参数^[37], 其公式为:

$$\delta\text{Eu} = \frac{\text{Eu}_N}{\sqrt{(\text{Sm}_N \cdot \text{Gd}_N)}} \quad (1)$$



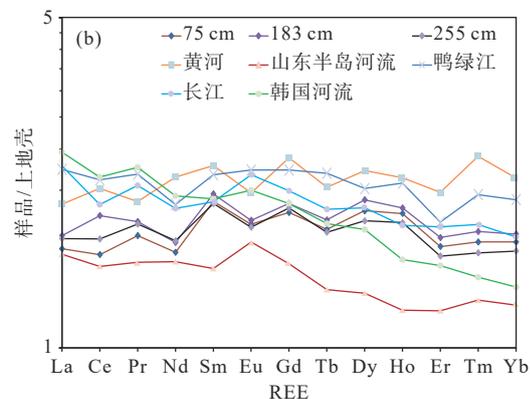
$$\delta\text{Ce} = \frac{\text{Ce}_N}{\sqrt{(\text{La}_N \cdot \text{Pr}_N)}} \quad (2)$$

式中: Eu_N 、 Sm_N 、 Gd_N 、 Ce_N 、 La_N 、 Pr_N 为球粒陨石标准化值。

Eu 的异常值能够反映沉积物的分异程度, 通过球粒陨石标准化模式^[34]计算得到的 δEu 值, 其分布范围为0.52~0.56, 平均值为0.54, 标准偏差仅为0.01(表2)。这一显著的负 Eu 异常表明, 与球粒陨石相比, 沉积物经历了一定程度的分异。此结果与黄河沉积物中 $<63 \mu\text{m}$ 粒级组分的 $(\delta\text{Eu})_N$ 值(0.65~0.76)^[11]相一致。 $(\delta\text{Ce})_N$ 值分布范围0.72~1.45, 平均值为1.11, 标准偏差为0.17(表2)。这表明存在较弱的 Ce 负异常-正异常, 反映出在源区岩样风化过程中以及在陆架海的沉积过程中, 存在 Ce 异常的条件。在曲线上 $(\delta\text{Eu})_N$ 和 $(\delta\text{Ce})_N$ 呈现镜像变化(图4)。

3.2.3 REE配分模式

球粒陨石代表了地球的原始物质组成, 其特点是轻稀土元素和重稀土元素之间不存在明显的分馏。因此, 以球粒陨石为参照进行标准化处理^[34], 可以揭示沉积物相对地球原始物质的分异程度。ZZ04柱状样的稀土元素经过球粒陨石标准化后的配分曲线如图5a所示, 其中, La — Eu 的轻稀土元素曲线较陡, 而 Eu — Yb 的曲线则相对平缓, 表现出明显的轻稀土富集, 而重稀土则保持相对稳定, 形成了左高右低、右倾的“V”字型曲线。这表明轻、重稀土之间存在显著的分异性。 Ce 在2.91 m深度处表现出负异常, 但在大多数深度段上没有明显的异常, Eu 则表现为谷型, 显示出中度亏损。球粒陨石配分曲线的一致性表明, 研究区的沉积物相对于球粒陨石, 均具有相同的物源区, 即主要来源于



(a) ZZ04 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线^[34]; (b) ZZ04 与各河流稀土元素上陆壳标准化配分曲线^[38]

图5 ZZ04柱状样稀土元素配分模式

Fig.5 The rare earth element distribution pattern of the Core ZZ04 sample

陆源物质。

上陆壳沉积物的稀土元素含量通常与陆源碎屑沉积物非常接近, 因此, 采用上陆壳标准化^[38]处理沉积物, 可以更精确地揭示沉积物稀土元素组成的细微差异。通过将 ZZ04 柱状样品、黄河、山东半岛河流、鸭绿江、长江以及韩国河流(包括汉江、锦江和荣山江)的稀土元素进行上陆壳标准化后对比分析(图 5b)。ZZ04 的配分曲线接近平直, 显示出微弱的 Nd 和 Eu 负异常, 且各曲线基本平行排列。韩国河流(绿色)和山东半岛小型河流(红色)的稀土曲线呈现出轻稀土富集而重稀土亏损的右倾形态, 这与中国河流的曲线形态存在明显差异。ZZ04 沉积物的稀土元素配分模式继承了中国陆地上陆壳的特点, 不同深度段的沉积物在稀土元素配分模式的一致性表明, 本研究区的沉积物具有相同的物源区, 且在沉积过程中仅 Ce 发生了微弱的分异。此外通过对比不同河流的配分曲线, 发现 ZZ04 与黄河的配分曲线较为接近, 而与韩国河流和山东半岛河流的曲线存在较大差异。

3.3 稀土元素相关性分析及控制因素

根据前人的研究成果, 稀土元素的含量与多种因素密切相关, 包括源区物质组成、化学风化作用、沉积物的粒度、矿物成分和气候条件等^[39-41]。这些因素共同作用使稀土元素成为沉积物环境和物源信息的综合指示器, 其中, 物源被普遍认为是影响稀土元素分布的主要因素^[42-44]。此外, 沉积物的粒度也是影响沉积物稀土元素组成和分布的关键因素之一。稀土元素倾向于在细粒沉积物中富集, 尤

其是在粉砂与黏土中, 这些细颗粒物易于吸附稀土元素而使其富集。相反, 在砂质沉积物中, 由于石英和长石的稀释作用, 稀土元素会发生分馏^[10]。

对 ZZ04 柱状样品的平均粒径(Mz)、 ΣREE 、 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 、 $(\delta Eu)_N$ 、 $(\delta Ce)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 和 $(La/Sm)_N$ 等参数进行相关性分析(表 3), 结果显示, 与 ΣREE 相关性最强的是 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$, 相关系数达到 0.94, 其次是 $(La/Sm)_N$, 相关系数为 0.801, 而与 $(\delta Ce)_N$ 的相关系数为 0.755。相比之下, ΣREE 与 $(\delta Eu)_N$ 的相关性较弱, 相关系数仅为 0.334。

通常粒度被认为是控制稀土元素组成的一个关键因素^[45]。根据前人的研究, 随着沉积物的粒度从粗到细, ΣREE 含量逐渐升高, 这一现象被称为“元素的粒度控制效应”。然而, 对于 ZZ04 柱状样而言, 平均粒径与稀土元素的相关性中等, 所有情况下的相关系数都约为 0.3(表 3)。ZZ04 沉积物的颗粒较细, 粒径主要分布在 $6\Phi \sim 7\Phi$, 几乎全为粉砂, 由于成分比较单一, 粒度对稀土元素含量影响较弱。通过图 2—4 可以看出, 稀土元素下段的值比上段高, 是由于下段的黏土含量较上段较高所致, 说明本研究区稀土元素含量受细粒控制。

3.4 山东半岛泥楔沉积物的物源分析

前人研究已经证实, 影响北黄海陆架现代沉积的主要河流包括中国大陆的黄河、鸭绿江、长江、以及韩国的河流(汉江、锦江和荣山江等)^[14,36]。根据本研究前述分析, 山东半岛泥楔沉积物的稀土元素组成显示出一定的差异, 并且受到不同控制因素

表 3 ZZ04 柱状样沉积物稀土元素特征参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of characteristic parameters of rare earth elements in the Core ZZ04 sediment

	$\Sigma REE/(\mu g/g)$	$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$(\delta Eu)_N$	$(\delta Ce)_N$	Mz/Φ	砂/%	粉砂/%	黏土/%
$\Sigma REE/(\mu g/g)$	1	0.940	0.587	0.801	0.352	0.334	0.755	0.270	-0.131	-0.295	0.290
$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	0.940	1	0.720	0.843	0.489	0.335	0.690	0.279	-0.137	-0.277	0.276
$(La/Yb)_N$	0.587	0.720	1	0.842	0.868	0.417	0.013	0.284	-0.091	-0.319	0.300
$(La/Sm)_N$	0.801	0.843	0.842	1	0.594	0.294	0.330	0.298	-0.039	-0.411	0.365
$(Gd/Yb)_N$	0.352	0.489	0.868	0.594	1	0.200	-0.153	0.211	-0.083	-0.198	0.194
$(\delta Eu)_N$	0.334	0.335	0.417	0.294	0.200	1	0.041	0.136	-0.104	-0.124	0.136
$(\delta Ce)_N$	0.755	0.690	0.013	0.330	-0.153	0.041	1	0.103	-0.131	-0.037	0.068
Mz/Φ	0.270	0.279	0.284	0.298	0.211	0.136	0.103	1	-0.761	-0.860	0.950
砂/%	-0.131	-0.137	-0.091	-0.039	-0.083	-0.104	-0.131	-0.761	1	0.382	-0.603
粉砂/%	-0.295	-0.277	-0.319	-0.411	-0.198	-0.124	-0.037	-0.860	0.382	1	-0.967
黏土/%	0.290	0.276	0.300	0.365	0.194	0.136	0.068	0.950	-0.603	-0.967	1

注: 经球粒陨石和上陆壳标准化的分异系数结果相等。

影响, 稀土元素因其在表生环境中具有相对稳定的地球化学特性, 能够在经历各种岩石风化、搬运和沉积过程后, 将源区的信息带入新的混合沉积物中。因此, 稀土元素可能成为判别不同来源沉积物的重要标志。

为了量化沉积物与周边河流沉积物的接近程度, 常用判别函数 DF 表示^[46-47], 其表达式为:

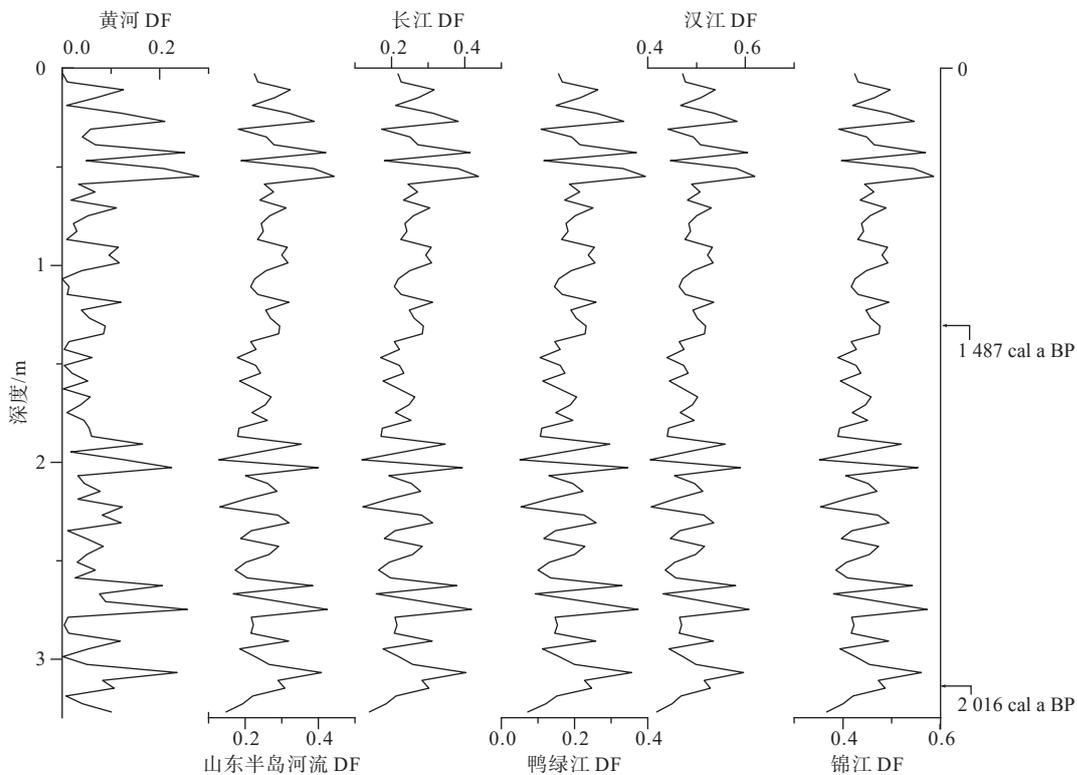
$$DF = |n_{ix} - n_{im}| / n_{im} \quad (3)$$

式中: n_{ix} 为 ZZ04 柱状样中元素 i 的质量分数或 2 种元素质量分数比, x 为测试的样本点;

n_{im} 为周围河流沉积物中元素 i 的质量分数或

2 种元素的质量分数的比值, m 为河流的样本点。

判别函数 DF 的值越小, 2 种沉积物的相似程度越高。使用判别函数 DF 的前提条件是, 所选用的 2 种元素应具有相似的化学性质, 并且能够在风化和沉积过程中同时被带入和带出, 而稀土元素恰好满足这一条件。本文采用 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值进行判别函数分析(图 6), 结果显示, 汉江和锦江的 DF 值明显高于山东半岛河流、长江和鸭绿江的 DF 值, 表明韩国河流对该研究区域的影响较小。相比之下, 黄河的 DF 值更接近于 0, 意味着 ZZ04 沉积物组成与黄河沉积物组成最为相似。



判别函数中河流的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值的来源: 黄河来自本研究; 山东半岛河流引用自文献 [32]; 长江、鸭绿江、汉江和锦江引用自文献 [33] 的平均值

图 6 ZZ04 柱状样沉积物的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 判别函数随深度的变化

Fig.6 Variation of the $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ discrimination function with depth in the Core ZZ04 sediment

通过 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}} - (\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 的交会图, 可作为区分不同来源沉积物的有效地球化学指标, 并已在中国各个海域的研究中得到成功应用^[48]。为了进一步探究物源特征, 本文将研究区附近的 3 个钻孔 NYS101、NYS102 和 DLC70-2 浅部 3 m 以内的稀土元素数据纳入分析, 并进行交会作图(图 7)。可以明显看出, ZZ04、NYS101 和 NYS102 主要落在黄河型的范围之内, 说明三者受黄河物源的影响; 而位于北边的 DLC70-2 落在黄河和鸭绿江型的范

围之内, 说明 DLC70-2 除了主要受到黄河物源影响之外, 部分还受到鸭绿江物源的影响。

山东半岛泥楔沉积体的沉积演化是一个复杂的过程, 受多种因素的共同影响, 包括与黄河入海泥砂、海侵作用对沉积区及邻区海底沉积物的改造、东亚冬季风的增强、冰后期海平面的阶梯式上升、渤海潮流强度及流系的变化以及黄河入海口位置的变迁等^[49-50]。自全新世以来, 随着海平面的逐步上升, 北黄海逐渐由末次冰期裸露陆架变为滨海-

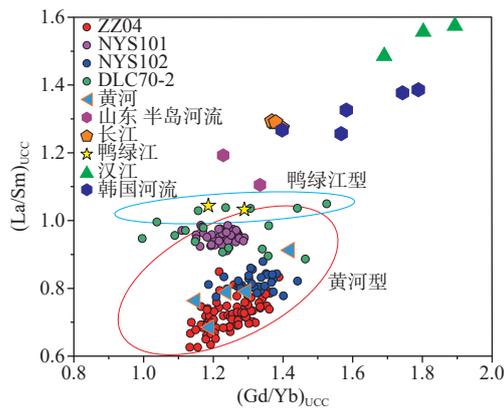


图 7 稀土元素交会图判断物源 (经过上陆壳标准化)
Fig.7 Rare earth element crossplot for provenance analysis (normalized to the Upper Continental Crust)

浅海相沉积环境^[5], 7 ka 以来现代环流体系逐渐形成, 山东半岛北部海域泥楔是在现代环流体系的影响下形成^[5]。黄海暖流和沿岸流的逐渐增强, 使得黄河携带的陆源碎屑沉积物在渤海沿岸流、山东沿岸流以及潮汐波浪等动力作用下, 穿过渤海海峡进入黄海, 在此过程中由于受到由南到北的黄海暖流的顶托作用, 沉积物流速降低, 导致细颗粒物在山东半岛沿岸大量沉积, 形成了独特的“Ω”型水下三角洲。2 ka 以来, ZZ04 柱状样品显示出粒度向上变粗的趋势, 这可能是由于冰后期黄河三角洲连续进积, 导致黄河入海口与研究区之间的距离逐渐缩短。

4 结论

(1) 山东半岛北部海域的 ZZ04 柱状样沉积物主要由粉砂构成, 其平均含量高达 78%, 而砂含量相对较少, 物质组分单一, 沉积物的粒度向上先变细再变粗, 这一现象可归因于黄河三角洲的持续推进粒度出现逆粒序。

(2) ZZ04 柱状样中的稀土元素经球粒陨石标准化后, 显示出轻稀土富集而重稀土平稳的右倾“V”字型特征, 为明显的陆源型; 经上陆壳标准化后, ZZ04 稀土配分曲线与黄河比较相似, 而与韩国河流以及山东半岛曲线存在较大差异。

(3) 自 2 ka 以来, 山东半岛泥楔的稀土元素分布受“粒度效应”控制, 其物源主要来自黄河, 随着现代海洋环流体系的建立, 黄河携带的细粒沉积物沿着山东沿岸流向东流动, 受到由南向北的黄海暖流顶托作用, 在山东半岛堆积下来, 形成“Ω”型水下三角洲。

参考文献:

- [1] MILLIMAN J D, QIN Y S, REN M E, et al. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the Yellow River (Huanghe) example[J]. *The Journal of Geology*, 1987, 95(6): 751-762.
- [2] ALEXANDER C R, DEMASTER D J, NITTROUER C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 51-72.
- [3] 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.
- [4] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 604-615.
CHENG Peng, GAO Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604-615.
- [5] LIU J, SAITO Y, WANG H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinof orm off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165-187.
- [6] 李国刚. 中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. *海洋学报(中文版)*, 1990, 12(4): 470-479.
LI Guogang. Composition, distribution and geological significance of clay minerals in surface sediments of offshore China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(4): 470-479.
- [7] 赵松龄, 于洪军. 晚更新世末期黄、渤海陆架沙漠化环境的形成[J]. *第四纪研究*, 1996, 1: 42-47.
ZHAO Songling, YU Hongjun. Shelf desertization environment in the Bohai and Yellow seas during the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Science*, 1996, 1: 42-47.
- [8] HU D X. Upwelling and sedimentation dynamics[J]. *China Journal Oceanology Limnology*, 1984, 2(1): 12-19.
- [9] 程鹏. 北黄海细颗粒物质的沉积特征与运输过程[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000.
CHENG Peng. Sediment characteristics and transport processes of fine-grain material over the Northern Yellow sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy, 2000.
- [10] 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: 275-297.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 赵一阳, 韩桂荣, 张静, 等. 东海沉积物中锆及稀土元素的若

- 干地球化学特征 [J]. 科学通报, 1982, 27(22): 1390-1392.
- ZHAO Yiyang, Han Guirong, Zhang Jing, et al. Geochemical characteristics of zirconium and rare earth elements in sediments of East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1982, 27(22): 1390-1392.
- [14] 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. Implications of rare earth elements for provenance in the Yalu Estuary and its adjacent sea area[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(4): 95-103.
- [15] 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.
- [16] DOU Y G, YANG S Y, LIM D I, et al. Provenance discrimination of last deglacial and Holocene sediments in the southwest of Cheju Island, East China Sea[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2015, 422: 25-35.
- [17] 郑世雯, 范德江, 刘明, 等. 渤海中部现代黄河沉积物影响范围的稀土元素证据 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2017, 47(6): 95-103.
- ZHENG Shiwen, FAN Dejiang, LIU Ming, et al. Rare earth element evidence for the modern Yellow River origin sediments in the middle Bohai sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(6): 95-103.
- [18] HU B Q, LI J, ZHAO J T, et al. Sr-Nd isotopic geochemistry of Holocene sediments from the South Yellow Sea: implications for provenance and monsoon variability[J]. *Chemical Geology*, 2018, 479: 102-112.
- [19] 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 Xianhong, 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 Geoscientifica Sinica, 2018, 39(1): 37-44.
- [20] JUNG H, LEE J, JEONG J B, et al. Developing sediment provenance discrimination tracers using major elements in East China Sea mud deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 253: 105721.
- [21] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- XU Dongyu, LIU Xiqing, ZHANG Xunhua, et al. Offshore Geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [22] WU S Y, LIU J, CHEN J W, et al. Characteristics of Milankovitch cycles recorded in Eocene strata in the eastern depression of North Yellow Sea Basin, North China[J]. China Geology, 2021, 4(2): 276-289.
- [23] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989.
- QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong. Geology of Yellow Sea[M]. Beijing: Maritime Press, 1989.
- [24] WU S Y, LIU J, CHU H X, et al. Identification of three stages of paleochannels and main source analysis beginning in the middle Pleistocene in the western Bohai Sea in North China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024, 296: 108601.
- [25] FOLK R L, WARD W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- [26] LIU J, SAITO Y, KONG X H, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(7): 846-855.
- [27] CHEN X H, LI R H, LAN X H, et al. Stratigraphy of late Quaternary deposits in the mid-western North Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(6): 2130-2153.
- [28] 蓝先洪, 陈晓辉, 密蓓蓓, 等. 晚更新世以来北黄海中部沉积物常量微量元素的分布及物源识别 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(4): 1-10.
- LAN Xianhong, CHEN Xiaohui, MI Beibei, et al. Distribution pattern and source of major and trace elements in the central North Yellow Sea since Late Pleistocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 1-10.
- [29] SOUTHON J, KASHGARIAN M, FONTUGNE M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [30] REIMER P J, BARD E, BAYLISS A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [31] 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.
- [32] 张晓波, 张勇, 孔祥淮, 等. 山东半岛南部近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 57-66.
- ZHANG Xiaobo, ZHANG Yong, KONG Xianghui, et al. Rare earth elements analysis for provenance study of surface sediments off south Shandong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(3): 57-66.
- [33] 杨守业, 李从先, LEE C B. 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): 1233-1236.
- YANG Shouye, LI Congxian, LEE C B. Rare earth element geochemistry and sediment source tracing in rivers around the Yellow Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(11): 1233-1236.
- [34] 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.

- [35] 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, 1: 56-65.
WANG Xianjue, CHEN Yuwei, LEI Jianquan, et al. Rare earth element geochemistry in sea-floor sediments in the continental shelf of East China Sea[J]. *Geochimica*, 1982, 1: 56-65.
- [36] 严杰, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口外海域柱状沉积物稀土元素的分布特征及物源指示 [J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 601-609.
YAN Jie, GAO Jianhua, LI Jun, et al. Study of rare earth element compositions and their implications for material sources in the core sediments in the sea area outside the Yalu River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(6): 601-609.
- [37] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
CHEN Deqian, CHEN Gang. *Practical Rare Earth Element Geochemistry* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [38] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [39] NECHAEV V P, ISPHORDING W C. Heavy mineral assemblages of continental margins as indicators of plate-tectonic environments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63: 1110-1117.
- [40] NESBITT H W, MARKOVICS G, PRICE R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] CONDIE K C. Another look at rare earth elements in shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.
- [44] SONG Y, CHOI M S. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3): 328-342.
- [45] 杨守业, 李从先, JUNG H S. 中韩河流沉积物微量元素地球化学研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 19-24.
YANG Shouye, LI Congxian, JUNG H S, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese and Korean river sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(2): 19-24.
- [46] 杨守业, 李从先, 张家强. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物物源研究 [J]. 古地理学报, 2000, 2(2): 65-72.
YANG Shouye, LI Congxian, ZHANG Jiaqiang. Palaeogeographic evolution of coastal plain and provenance study of post-glacial sediments in north Jiangsu Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(2): 65-72.
- [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 & Quaternary Geology*, 2001, 21(3): 51-56.
- [48] 陈晓辉. 北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 2014.
CHEN Xiaohui. Sedimentary stratigraphic structure and provenance environmental evolution in the North Yellow Sea during the Late Quaternary[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [49] XUE C T, QIN Y C, YE S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinof orm off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 478-496.
- [50] 王中波, 陆凯, 温珍河, 等. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素 [J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2709-2721.
WANG Zhongbo, LU Kai, WEN Zhenhe, et al. Grain size compositions and their influencing factors of the surface sediments in eastern China seas[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2709-2721.

Characteristics and provenance of rare earth element in mud wedge in the sea area north of Shandong Peninsula since 2 ka

WU Shuyu^{1,2,3,4,5}, LIU Jun^{1,5*}, FENG Yongcai¹, CHANG qing¹, LI Jialin¹, YUAN Jidong¹,
LI Mengting¹, NING Fulong², LIU Changling⁵, SONG Xuan⁶

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China; 2 School of Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China; 3 Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 4 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 6 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The mud wedge in the Shandong Peninsula serves as a pivotal sedimentary body, linking the Bohai Sea with the Yellow Sea. It plays a significant role in the sedimentation system of China seas as an essential component of "source-sink" system in the edge of the Chinese continental shelf. The controlling factors of rare earth elements (REEs) and the provenance of the wedge sediment in this area were studied based on the analysis of AMS ¹⁴C dating, grain size, and REEs content of the ZZ04 boxcore samples at the northern offshore of the Shandong Peninsula. Results indicate that the boxcore samples consist of mainly silty sand in relatively simple material composition with a trend of coarsening in grain size from deeper to shallower depths. Upon normalization with chondrites, the REEs exhibit a characteristic enrichment of light rare earth elements (LREEs) and relative stability of heavy rare earth elements (HREEs), forming a distinct right-leaning V-shaped pattern indicative of a clear terrigenous signature. Further comparative analysis on the REEs between the ZZ04 sample and surrounding rivers' after continental crust normalization revealed that the distribution patterns of ZZ04 samples closely resemble those of the Yellow River. In contrast, they show significant differences from those of the rivers in South Korea and the Shandong Peninsula. Additionally, correlation analysis between REEs and grain size suggested that the distribution of REEs in the mud wedge is influenced by the "grain size effect" since approximately 2,000 years ago. The source of the mud wedge comes mainly from the Yellow River. After the establishment of the modern ocean circulation system, the fine-grained sediments carried by the Yellow River flowed eastward along the northern coast of the Shandong Peninsula through the Bohai Strait into the Yellow Sea, and then encountered by the northward Yellow Sea Warm Current, which decreased the flow velocity and resulted in the settlement of a large amount of fine-grained matter in the northern waters of the Shandong Peninsula, forming a unique Ω-shaped underwater delta.

Key words: Shandong Peninsula; grain size; rare earth element; mud wedge; provenance