

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020082001

冲绳海槽中南部不同环境表层沉积物质来源

邹亮^{1,2}, 窦衍光^{1,2}, 陈晓辉^{1,2}, 胡邦琦^{1,2}, 林曦¹

1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术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 266071

摘要: 对冲绳海槽中南部 3 种不同沉积环境 (东海外陆架、东海陆坡和冲绳海槽) 表层沉积物进行了稀土等元素地球化学分析, 结果显示, 冲绳海槽和陆坡表层沉积物具有与台湾物质来源类似的稀土元素配分模式, La/Sm-Gd/Yb 散点图也显示海槽和陆坡沉积物主要分布在台湾物源端元区, 表明冲绳海槽中南部海槽和陆坡表层沉积物主要来源于台湾, 而外陆架沉积物明显的重稀土亏损与大陆河流 (特别是长江、黄河) 沉积物来源较为一致。为进一步判断外陆架表层沉积物来源, 对外陆架沉积物重矿物进行分析鉴定, 结果显示, 外陆架沉积物重矿物以普通角闪石-绿帘石-石榴石-赤褐铁矿为组合特征, 与长江沉积物重矿物组成特征类似, 其明显缺乏台湾河流来源的典型重矿物锆石、黄河来源典型重矿物云母、浙闽沿岸来源典型重矿物磁铁矿, 说明台湾、黄河和浙闽沿岸并非研究区外陆架表层沉积物主要物源。根据以往测年等研究成果, 研究区外陆架沉积物年代较老, 应为古长江物质经东海现代环流体系不断改造而成。

关键词: 物质来源; 稀土元素; 重矿物; 表层沉积物; 冲绳海槽

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Provenance analysis for surface sediments in different depositional environments of the middle-south Okinawa Trough

ZOU Liang^{1,2}, DOU Yanguang^{1,2}, CHEN Xiaohui^{1,2}, HU Bangqi^{1,2}, LIN Xi¹

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, China Geology Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: In this paper, surface sediments taken from three different depositional environments, i.e. the outer continental shelf, slope, and trough, of the middle-south Okinawa Trough were analyzed for rare earth elements (REE). The results suggest that the REE distribution patterns of the surface sediments from the continental slope and the Okinawa Trough are quite similar to those from Taiwan. The discrimination plot of La/Sm-Gd/Yb also shows that the surface sediments from continental slope and the Okinawa Trough are mainly located in the diagram close to the provenance end of Taiwan, further supporting the conclusion that the surface sediments of the continental slope and the Okinawa Trough are doubtlessly sourced from Taiwan. The obvious loss of heavy REE in the sediments of the outer continental shelf is consistent with the source of continental river sediments. In order to recognize the source of surface sediments in the outer shelf sedimentary area, the heavy mineral compositions of these sediments were analyzed. The results show that the heavy mineral assemblages of the outer continental shelf sediments are mainly composed of common hornblende, epidote, garnet, limonite, similar to the source composition of the Changjiang river. The outer continental shelf sediments are lack of zircon, mica, and magnetite, typical heavy minerals found in Taiwan, Huanghe river, and Minjiang river sediments respectively, which suggests that Taiwan, Yellow River, and the coast of Zhejiang and Fujian are not the main contributors to the outer continental shelf sediments. According to the results of previous dating data, the sediments of the outer shelf are relatively old, suggesting that the outer shelf sediments should be formed by the rework of the palaeo-Changjiang river materials by the modern circulation system of the East China Sea.

Key words: provenance; rare earth elements; heavy minerals; surface sediments; Okinawa Trough

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“1: 25 万锦西、日照和霞浦县等图幅海洋区域地质调查”(DD20160139); 国家自然科学基金项目“晚第四纪以来冲绳海槽中深层水源区演变的沉积记录及其古气候意义”(41776077), “菲律宾海盆底层水体性质对中更新世气候转型的响应机制”(41976192)

作者简介: 邹亮 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地质与地球化学研究, E-mail: zouliang04@163.com

收稿日期: 2020-08-20; **改回日期:** 2020-12-15. 文凤英编辑

冲绳海槽是一个具有过渡性地壳特征的大陆边缘盆地,西侧与宽广的东海外陆架相连,之间有东海陆坡作为东海陆架与冲绳海槽的折转带;东侧为琉球岛弧,将冲绳海槽与太平洋分隔。东海外陆架水深较浅,地形平坦,接受了大量末次冰期低海平面以来的陆源沉积物,随着全新世海平面的上升,陆源物质输入逐渐减少,台湾暖流和黑潮的形成开始影响和改造着外陆架沉积物^[1]。东海陆坡地形坡度大,水深从200 m开始急速下降为1000 m及以下,受构造控制,广泛发育断裂谷、断裂沟、陡坡、陡坎等多种地貌^[2],块体搬运(滑塌和滑坡)和浊流是东海陆坡主要的沉积物搬运方式,形成海底峡谷-海底扇沉积地层结构^[3]。冲绳海槽大部分水深超过1000 m,海槽中心水深大于2000 m,类似于半深海盆地,是天然陆源碎屑物质“汇”积地,其良好的沉积环境是研究“源-汇”过程和气候环境变化的优质载体。

冲绳海槽沉积物来源复杂,大陆和台湾河流携带入海的陆源碎屑物质是其主要组成。另外由于构造火山活动频繁和半深海沉积环境,火山物质和生物碎屑也对沉积物有一定贡献。在末次冰盛期,东海海平面相对较低,大陆一些大型的河流,例如长江、黄河等入海口向外海延伸,使得大量大陆碎屑沉积于外陆架、陆坡以及海槽内,海槽沉积物被认为主要来源于长江、黄河等大陆河流携带的沉积物质^[4-8]。随着气候回暖,东海海平面不断升高,海槽碎屑物质来源变得更加复杂和具有争议。特别是全新世以来,黑潮不断加强,其主轴又重新回到冲绳海槽,由南向北沿海槽西边界流动^[9],一方面对大陆陆源向海槽输入造成阻隔,在一定程度上限制了大陆陆源物质的供应^[10],另一方面黑潮在南端

进入海槽时携带台湾陆源物质由南向北沿海槽输送,部分台湾物质甚至可到达冲绳海槽北部^[11],导致不同位置、不同时期冲绳海槽陆源物质来源都可能产生差异^[12]。海槽南部存在大型热液活动区,北部沉积物中广泛分布阶段性火山物质,对区域陆源输入都可能产生影响。为进一步探索冲绳海槽区域表层沉积物各物源控制范围及贡献,本文拟选取冲绳海槽中部位置,范围涵盖大陆架、大陆坡、冲绳海槽3种不同沉积环境,将其作为一个系统,以探讨东海外陆架-陆坡-海槽沉积物的主要组分来源。

1 材料与方法

本文分析样品由青岛海洋地质研究所于2015年通过箱式取样器获得,样品分析均为表层沉积物(0~2 cm),取样位置包括东海外陆架(水深小于200 m)、陆坡(水深200~1000 m)、冲绳海槽(水深大于1000 m)3种不同沉积环境,取得的294个表层沉积物样品分布见图1,其中外陆架取得158个样品,陆坡区取得44个样品,海槽区取得92个样品。

稀土等微量元素分析:所有沉积物样品在40℃温度下烘干后,在玛瑙研钵中研磨至粉末状(200目),放入坩埚中在高温下灼烧破坏有机质。称取一定量的样品放入溶样容器中,经HNO₃-HF-HClO₄反复溶解完全,采用纯净的稀硝酸稀释,定容,利用等离子质谱分析方法(Thermo X Series 2质谱仪)测定REEs等微量元素的含量。所有实验均在国土资源部海洋地质实验室检测中心完成,标准物质使用国家一级标准物质GBW07309、GBW07333、GBW07344进行测试、结果监控,样品检测结果合格率100%,分析元素的相对误差小于5%。

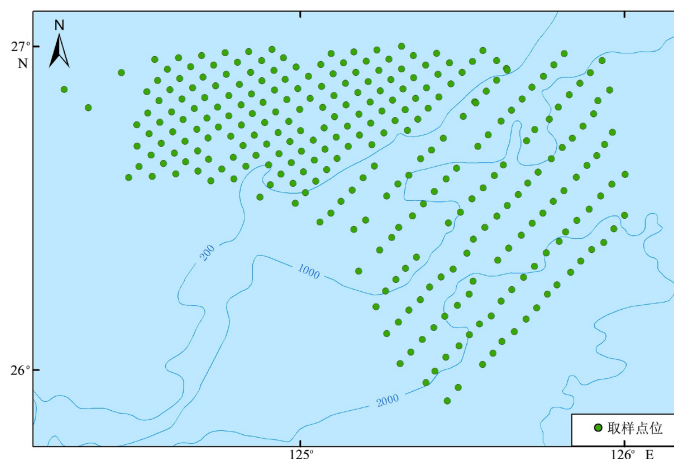


图1 取样位置

Fig.1 Locations of the surface samples

重矿物分析: 主要对东海外陆架区域 150 个样品进行了重矿物的分析鉴定。原始沉积物样品进行湿重称重, 记录数值(精度为 0.1 g), 称量体积后, 放进干燥皿, 将样品在 60 °C 的温度下烘干。烘干后称重并记录。将烘干后的样品放入干燥皿中用水浸泡, 利用细筛选出所需 0.25~0.063 mm 样品。样品分离采用重液法, 选择密度(相对密度)2.89 g/mL 的三溴甲烷(CHBr₃)。样品分离称量, 使用感量 0.001 g 天平; 样品分离后, 轻、重矿物达不到矿物定量的最低要求数(300 粒), 在该粒级样品中再取样品进行分离, 样品用除除外; 分离出的轻、重矿物, 轻矿物中基本不含重矿物, 重矿物中轻矿物的含量不得超过 10%。将分离出来的重矿物在双目实体镜下鉴别, 每个重矿物样品鉴定 300~500 颗, 然后统计每种重矿物的百分含量。重矿物的鉴定由自然资源部海洋地质实验检测中心完成。

2 结果

2.1 稀土元素组成特征

研究区表层沉积物稀土元素总含量(Σ REE)平面分布如图 2a 所示。稀土元素总含量范围为 38.28~

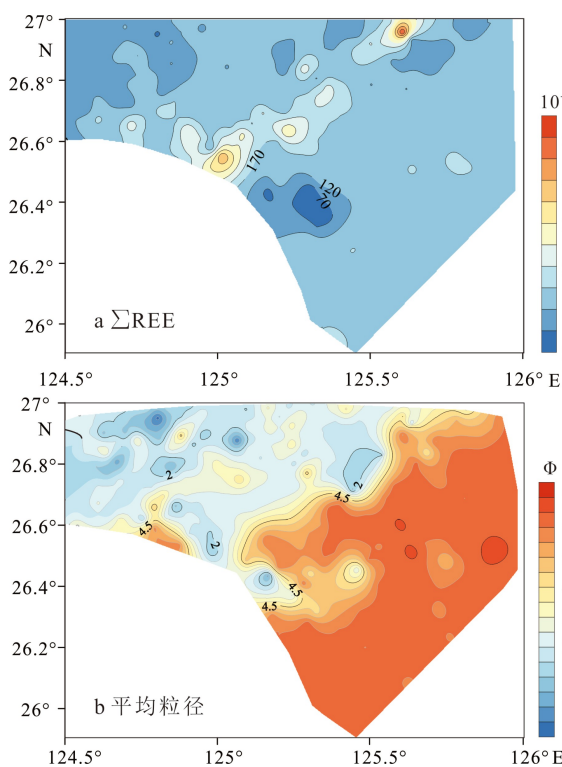


图 2 表层沉积物总稀土元素含量和平均粒径分布^[13]
Fig.2 Σ REE concentration and average grain size distribution of the surface sediments^[13]

532.01 $\mu\text{g/g}$, 平均为 145.9 $\mu\text{g/g}$ 。除陆坡区个别异常点, 整体上研究区稀土元素含量差别不大, 海槽区含量稍高, Σ REE 平均含量为 157.7 $\mu\text{g/g}$, 陆坡区 Σ REE 平均含量为 146.6 $\mu\text{g/g}$, 外陆架区含量稍低, Σ REE 平均含量为 138.9 $\mu\text{g/g}$ 。

海槽-陆坡-外陆架不同沉积环境典型表层沉积物上地壳标准化稀土元素配分模式如图 3 所示, 冲绳海槽与陆坡区沉积物稀土元素配分模式较为类似, 中稀土明显富集; 而陆架区沉积物与陆坡和冲绳海槽沉积物稀土元素配分模式有明显区别, 相对而言, 陆架区沉积物重稀土相对亏损。图 3 也显示了稀土元素含量整体上从海槽→陆坡→陆架有略微降低的趋势。研究区典型稀土元素含量见表 1。

2.2 外陆架沉积物重矿物组成特征

外陆架区表层沉积物重矿物含量远低于轻矿物, 质量百分含量为 1.17%~11.16%, 平均含量为 5.18%。

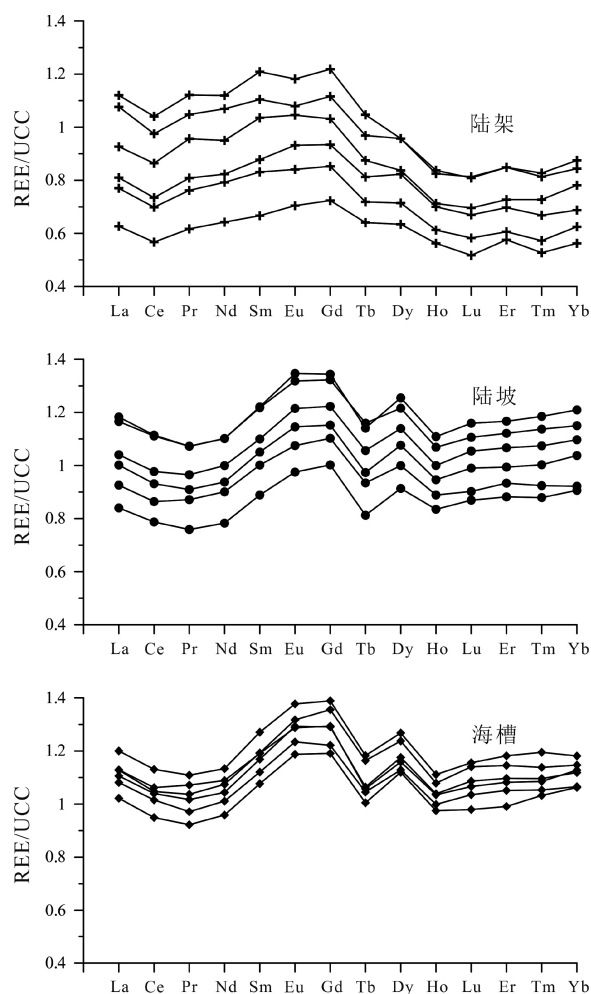


图 3 海槽-陆坡-外陆架典型样品上地壳标准化稀土元素配分模式

Fig.3 REE UCC-normalized patterns for typical samples from Okinawa Trough, slope, outer continental shelf

表1 研究区典型样品稀土元素含量
Table 1 REE concentrations of typical samples

	水深/m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
陆架	128.4	37.2	73.2	8.5	31.9	5.7	1.1	4.9	0.71	3.7	0.75	2.0	0.32	2.0	0.32
	128.0	32.0	67.6	7.6	28.1	5.0	1.0	4.3	0.61	3.2	0.61	1.7	0.26	1.6	0.25
	127.3	31.9	61.9	7.4	27.9	5.1	1.0	4.4	0.63	3.4	0.67	1.9	0.30	1.9	0.29
	140.0	26.4	52.2	6.4	24.1	4.4	0.9	3.7	0.52	2.7	0.53	1.4	0.22	1.4	0.21
	125.0	22.0	42.4	5.2	19.6	3.6	0.7	3.1	0.44	2.4	0.47	1.3	0.20	1.2	0.18
	110.0	23.6	46.3	5.7	21.6	3.9	0.9	3.3	0.47	2.5	0.48	1.3	0.19	1.2	0.18
	112.0	28.2	55.4	6.7	25.2	4.6	0.9	4.0	0.58	3.2	0.62	1.7	0.26	1.6	0.25
	128.0	28.1	54.2	6.5	24.5	4.4	1.0	3.9	0.55	2.9	0.58	1.6	0.24	1.5	0.22
	118.0	38.0	73.8	8.6	31.3	5.4	1.1	4.8	0.71	3.9	0.81	2.4	0.37	2.4	0.36
	170.0	28.8	56.7	6.8	25.3	4.5	0.8	3.8	0.52	2.7	0.51	1.4	0.20	1.3	0.20
陆坡	975.5	24.4	48.9	5.5	20.8	4.1	0.9	3.9	0.54	3.3	0.67	2.0	0.29	1.9	0.29
	573.9	36.7	73.4	7.9	29.3	5.7	1.1	5.2	0.70	4.1	0.81	2.3	0.33	2.2	0.34
	671.7	29.0	57.3	6.2	23.0	4.5	0.9	4.0	0.55	3.3	0.66	2.0	0.27	1.9	0.28
	956.6	33.9	67.7	7.3	27.5	5.2	1.1	4.8	0.66	4.0	0.80	2.4	0.34	2.3	0.34
	790.5	31.2	62.4	6.8	25.5	5.0	1.1	4.8	0.74	4.5	0.90	2.7	0.37	2.4	0.35
	830.0	30.0	60.0	6.6	24.9	4.8	1.0	4.3	0.59	3.5	0.71	2.1	0.30	2.0	0.29
	966.1	33.8	66.5	7.2	26.8	5.2	1.1	4.9	0.73	4.4	0.90	2.7	0.38	2.5	0.37
	987.1	32.2	63.6	7.0	26.4	5.1	1.1	4.8	0.65	4.1	0.83	2.4	0.36	2.4	0.35
	898.1	30.5	60.4	6.6	25.0	4.8	1.0	4.3	0.61	3.6	0.73	2.2	0.31	2.1	0.31
	929.3	31.2	61.9	6.7	25.3	4.9	1.0	4.5	0.66	3.9	0.78	2.3	0.33	2.3	0.33
海槽	2112.2	32.7	65.6	7.1	26.8	5.2	1.1	5.0	0.75	4.4	0.88	2.7	0.39	2.6	0.38
	2125.6	34.0	68.0	7.4	27.8	5.3	1.1	5.1	0.73	4.3	0.87	2.6	0.37	2.5	0.37
	2070.3	28.3	57.2	6.3	24.1	4.8	1.1	5.0	0.74	4.4	0.90	2.7	0.39	2.6	0.37
	2079.7	31.0	61.0	6.7	25.2	4.8	1.1	4.6	0.65	3.8	0.78	2.3	0.34	2.3	0.34
	2050.7	33.8	67.0	7.4	27.9	5.4	1.2	5.2	0.75	4.3	0.86	2.6	0.38	2.5	0.37
	1322.6	33.9	68.0	7.6	28.3	5.4	1.1	4.9	0.68	4.1	0.83	2.5	0.36	2.4	0.36
	1701.9	35.1	71.1	7.7	28.5	5.4	1.1	5.1	0.68	4.1	0.82	2.5	0.36	2.5	0.36
	1840.3	34.5	69.4	7.9	29.9	5.8	1.2	5.4	0.79	4.8	0.95	2.8	0.40	2.8	0.41
	2068.0	35.1	69.7	7.9	30.0	5.8	1.2	5.4	0.76	4.5	0.93	2.8	0.40	2.7	0.40
	2058.2	34.7	69.8	8.0	30.3	6.0	1.3	5.5	0.77	4.7	0.96	2.8	0.40	2.8	0.41

鉴定出的重矿物有40多种,包括金属矿物(磁铁矿、褐铁矿、菱铁矿、黄铁矿、赤铁矿、钛铁矿、白钛石、锐钛矿等)、闪石类(普通角闪石、透闪石、阳起石等)、帘石类(绿帘石、褐帘石、黝帘石)、辉石类(普通辉石、透辉石、斜方辉石)、片状矿物类(黑云母、白云母、金云母、绿泥石)、区域

变化或接触变质有关的重矿物(石榴石、蓝晶石、蓝闪石、十字石、红柱石、符山石、刚玉、硅线石等)、岩浆岩或气成热液重矿物类(黄玉、电气石、磷灰石、榍石、锆石、萤石等)、沉积矿物(海绿石、白云石、菱镁矿、天青石、重晶石、自生黄铁矿等)和其他矿物如风化碎屑、独居石、尖晶石等。图4

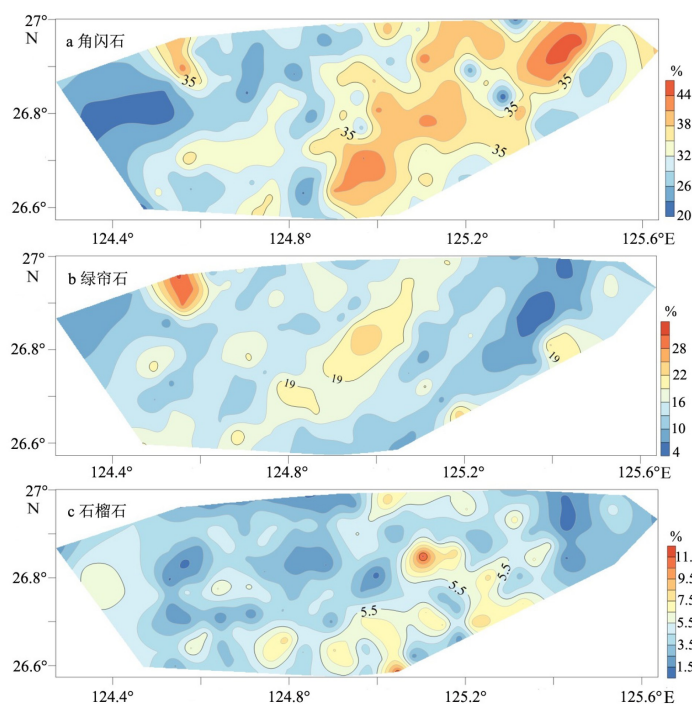


图 4 普通角闪石、绿帘石、石榴石颗粒百分含量分布

Fig.4 Distribution of common hornblende, epidote and garnet in the surface sediments

列出了几类主要重矿物(普通角闪石、绿帘石、石榴石)的平面分布特征。

普通角闪石是调查区中含量最高的重矿物,含量为 19.97%~45.06%,平均含量为 32.75%,整体分布具西低东高的趋势,西半区域平均含量约 21.8%,东半区域含量平均值可达 41.5% 以上。绿帘石含量仅次于普通角闪石,含量为 4.04%~31.87%,平均值为 14.48%。变质矿物以石榴石为主,分布较为普遍。绿帘石和石榴石含量变化无明显规律,局部点位含量相对较高。沉积物中主要重矿物数据统计见表 2。

表 2 重矿物含量数据统计

Table 2 Statistics on data of heavy mineral provinces

矿物统计	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准偏差	偏度	峰度
角闪石类	19.97	45.06	32.75	5.87	0.04	-0.81
帘石类	5.50	33.57	17.27	4.71	0.39	0.64
金属矿物	1.78	22.00	7.99	4.00	0.97	0.79
云母类	0	1.10	0.14	0.22	2.00	4.13
ZTR	0	2.01	0.75	0.38	1.07	1.48
石榴石	0.93	11.94	4.30	1.97	0.80	1.17
楣石	0	1.85	0.62	0.39	1.17	1.13
辉石类	0	2.00	0.20	0.21	4.49	35.90
岩屑	8.06	53.45	31.20	8.36	0.01	-0.11

3 讨论

3.1 稀土元素含量的粒度效应

海洋沉积物粒度的组成是影响沉积物中元素浓度及分布的重要因素。通常,稀土元素等微量元素在黏土和粉砂级组分中富集,含量相对较高,而在砂级组分中相对亏损,这主要是因为砂粒级组分中以石英矿物为主,石英矿物的主要化学成分是 SiO₂,受 SiO₂“稀释”的影响,其他元素例如 Al、K、Mg、Co、Cu、V、Zn 以及 REEs 的含量均相对较低^[14-15]。

根据 Fork 等人提出的沉积物分类三角图解法,研究区底质类型主要由砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂组成^[13]。东海外陆架沉积物类型主要以粉砂质砂和砂为主,局部分布砂质粉砂沉积物;东海陆坡沉积物类型主要以砂质粉砂为主,局部点位分布粉砂及粉砂质砂;冲绳海槽沉积物类型主要以粉砂为主,局部分布砂质粉砂^[13]。受粒度的影响,研究区沉积物大部分元素(例如 Al、K、Mg、Co、Cu、V 等)丰度遵循“粒度控制规律”,在海槽粉砂质沉积区含量相对较高,在陆架砂质沉积区含量相对较低(图 5)。

根据研究区稀土元素含量结果的分析可以看出,无论是稀土元素含量平面分布图(图 2),还是不

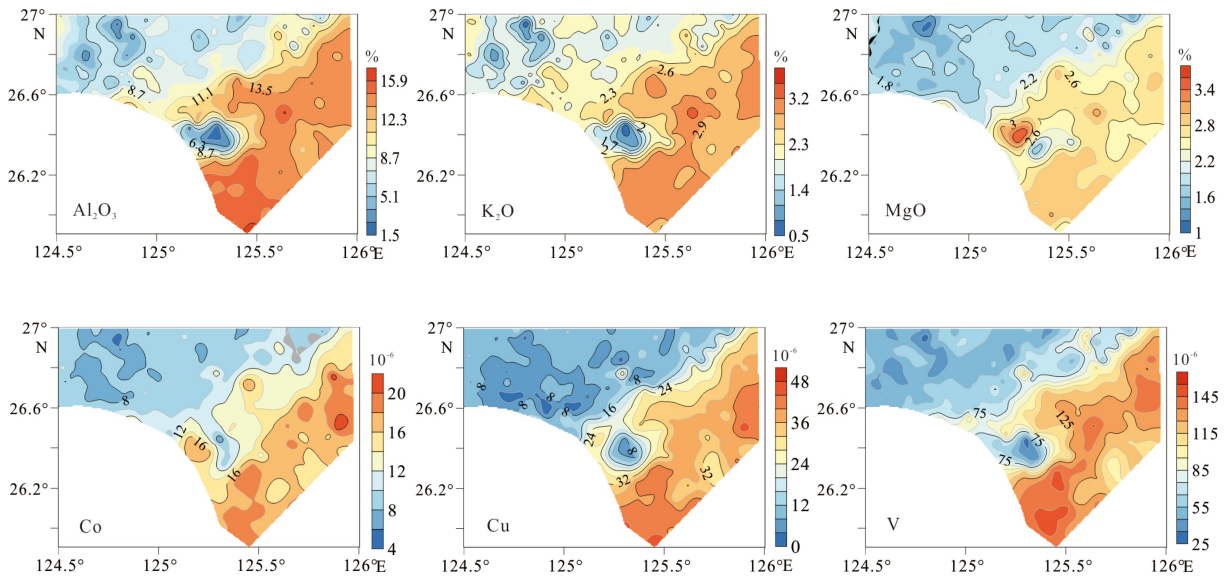


图5 Al、K、Mg、Co、Cu、V元素丰度分布

Fig.5 Some major and trace elements distribution of the surface sediments

同环境沉积区典型稀土元素配分模式图(图3), 稀土元素的含量从冲绳海槽→陆坡→外陆架都有略微降低的趋势, 海槽区 ΣREE 平均含量为 $157.7 \mu\text{g/g}$, 陆坡区 ΣREE 平均含量为 $146.6 \mu\text{g/g}$, 外陆架区 ΣREE 平均含量为 $138.9 \mu\text{g/g}$, 总体上同样遵循“粒度控制规律”。相较于大部分其他主微量元素(图5), 图2中显示的稀土元素含量变化相对而言不太明显, 可能是因为局部点位稀土元素含量异常导致的整体分区不明显。

3.2 稀土元素组成对物质来源的指示

全新世高海平面以来, 陆架-陆坡-冲绳海槽形成了复杂的洋流系统, 长江冲淡水、沿岸流、台湾暖流以及黑潮的相互影响, 使得冲绳海槽沉积物具有多种来源。除了海槽北部具有较多的火山物质^[16-17]以及区域性热液活动的产物^[18], 一般认为, 冲绳海槽接受了大量来源于长江和黄河的陆源碎屑物质^[19-22]。近年来, 越来越多的研究显示, 随着全新世海平面的上升, 黑潮加强, 其在冲绳海槽南部携带的台湾物质也是海槽沉积物重要的物质来源^[8,11,23]。

稀土元素因其晶体化学性质相似而密切共生, 同一地质体在经过风化搬运再沉积后, 稀土元素的组成依然会保持原岩的性质^[14,24-25], 稀土元素这种稳定的化学性质常被用来判别沉积物质的来源, 是沉积物源有效的指示剂^[25-26]。为了消除稀土元素锯齿状的含量变化, 通常都以标准化后的模式呈现。稀土元素的丰度可能受到粒度和重矿物的影响^[27], 但其配分模式曲线主要受物质来源的控制。图6展示

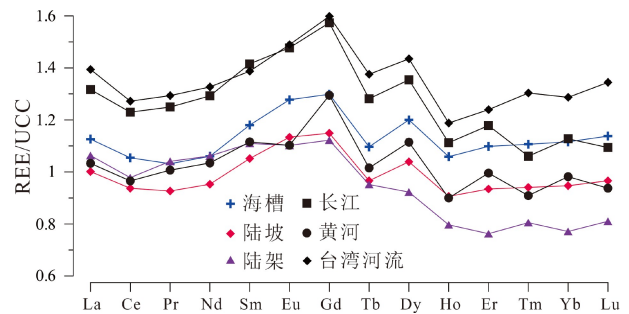


图6 各端元典型稀土元素配分模式

长江、黄河数据^[27], 台湾河流数据^[28]。

Fig.6 Distribution patterns of UCC-normalized REE

Changjiang and Huanghe data^[27], river data from Taiwan^[28].

了研究区冲绳海槽、陆坡、陆架沉积物以及长江、黄河、台湾河流典型沉积物稀土元素上地壳(UCC)标准化曲线。从标准化的稀土元素配分模式可以看出, 外陆架区具有与长江、黄河相似的稀土元素标准化曲线, 表现为相对的中稀土富集和明显的重稀土亏损, 但相比较而言又更加接近重稀土相对亏损严重的长江。海槽和陆坡沉积物稀土元素配分模式基本一致, 表现为中部相对凸起的中稀土富集, 这与台湾物源呈现的稀土元素标准化曲线变化特征有很高的相似之处。

为进一步探讨研究区不同沉积环境的物质来源, 利用轻、中、重稀土之间相互比值的散点图解能够较为直观地判别沉积物来源^[8,12,23]。除了长江、黄河、台湾河流携带大量的陆源碎屑物质入海, 浙闽沿岸一些小型河流、火山作用的产物等也可能对陆架和冲绳海槽沉积物有一定的贡献^[12-13,17]。图7

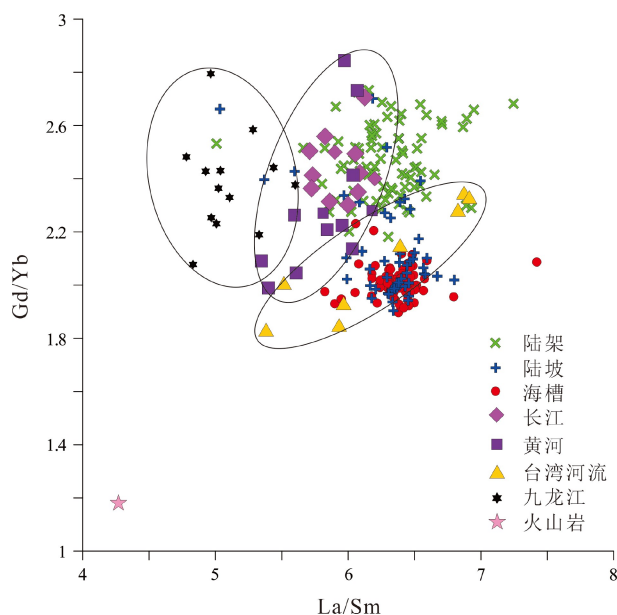


图 7 研究区及各物质端元沉积物 Gb/Yb-La/Sm 散点图
长江、黄河数据^[27], 台湾河流数据^[28], 九龙江数据^[31], 火山岩数据^[32]。

Fig. 7 Discrimination plot of Gb/Yb vs La/Sm for the
sediments of research area

Changjiang and Huanghe data^[27], river data from Taiwan^[28],
Jiulongjiang data^[31], volcanic data^[32].

展示了研究区海槽-陆坡-陆架不同沉积环境以及不同物源端元沉积物 La/Sm-Gd/Yb 散点图, 由于海槽热液活动具有明显的区域性, 而且迄今发现的热液区与研究区有一定的距离^[29-30], 本研究暂不考虑热液物质对研究区沉积物的贡献。

从图 7 中可以看出, 冲绳海槽沉积区与外陆架沉积物 La/Sm-Gd/Yb 散点图完全落在不同的区域, 最明显的特征就是海槽区沉积物重稀土含量相对较高, Gd/Yb 的值相对偏低; 陆坡区散点图点位大部分都与海槽区重叠, 小部分落在陆架区域, 表明陆坡沉积物来源与海槽基本相同, 但又保持了部分过渡区的性质。

对比各源区物质端元, 从整体上看, 台湾河流沉积物 La/Sm 相对偏高且 Gd/Yb 相对偏低, 在散点图中主要落在右下方。稀土元素的配分模式图(图 6)和散点图(图 7)都显示长江和黄河沉积物有类似的特征, 整体来说长江沉积物比黄河沉积物重稀土亏损更加严重。浙闽沿岸河流沉积物与长江、黄河沉积物也比较类似, 但相对而言, 其轻稀土亏损较严重, 导致 La/Sm 相对偏低。火山物质端元稀土元素组成差别明显, La/Sm 和 Gd/Yb 都显著偏低(图 7)。

上地壳(UCC)稀土元素标准化(图 6)显示海槽和台湾河流沉积物有类似的配分模式, La/Sm-Gd/Yb 散点图(图 7)也同样显示海槽沉积物主要分

布在台湾物质端元区域, 表明台湾河流携带的陆源物质可能是研究区海槽沉积物主要来源。陆坡典型沉积物稀土元素配分模式与海槽非常相似, 其 La/Sm-Gd/Yb 散点图分布与海槽区域类似, 大部分都落在台湾物质端元区域, 但也有小部分落在中国大陆河流物质端元区, 表明研究区陆坡沉积物主要来源也是台湾。

冲绳海槽与大陆河流沉积物稀土元素组成存在明显差别, 主要表现为大陆河流, 例如长江、黄河沉积物重稀土亏损(Gd/Yb 值偏大), 而海槽区表层沉积物中稀土富集(La/Sm 值偏小)。在末次冰期时, 东海海平面比现在低 130 m 左右, 大陆河流入海口可直接延伸至外陆架, 海槽主要沉积物为大陆河流输入^[8]。随着全新世海平面的上升, 台湾暖流的形成和黑潮的加强在东海陆架会形成水障, 很大程度上影响了近现代大陆陆源向冲绳海槽的输入^[10]。最近研究表明, 黑潮能够携带大量的台湾物质在冲绳海槽中南部沉积^[33-35], 部分台湾物质甚至可到达冲绳海槽北部^[11]。

外陆架区沉积物稀土元素标准化配分模式与大陆河流沉积物类似, 表现为重稀土相对亏损。La/Sm-Gd/Yb 散点图中陆架区主要落在长江黄河物质端元区域, 个别点位落在浙闽沿岸小河流区域和台湾物质端元, 表明研究区长江和黄河携带的碎屑沉积物可能是外陆架沉积物的主要来源。

3.3 外陆架重矿物组成对物质来源的指示

根据稀土元素的判别结果, 研究区海槽、陆坡与外陆架物质来源区分明显, 海槽和陆坡沉积物主要来源于台湾河流, 陆坡少部分样品有陆架的性质, 显现了过渡区的特点; 而外陆架沉积物主要来源于大陆各河流的输入。大陆潜在的输入端元长江、黄河、浙闽沿岸河流其稀土元素组成差别并不明显, 重稀土都表现为相对的亏损, 尤其是长江与黄河稀土元素组成相似度更高。原岩类型的不同往往导致其沉积物重矿物组合各具特征, 这也为确定沉积物物质来源及其性质提供了重要的示踪手段^[36-39]。外陆架沉积物主要为砂和粉砂质砂沉积, 重矿物含量较高, 很适合利用沉积物重矿物的组成特征来共同探讨其沉积物来源于何种大陆河流的输入。

根据对重矿物分析鉴定结果, 外陆架沉积物矿物组成的特征是普通角闪石占主导, 平均含量为 32.7%; 绿帘石含量仅次于普通角闪石, 平均值为 14.5%; 石榴石含量偏低但分布较为普遍, 局部点位含量相对较高, 可达 10% 以上; 金属类矿物例如钛

铁矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿、白钛石、锐钛矿中,赤褐铁矿是含量相对最高的矿物种类。重矿物以普通角闪石-绿帘石-石榴石-赤褐铁矿为组合特征。

根据前人对长江、黄河、浙闽河流、台湾河流的研究结果,其流域地质背景存在明显差别,导致各物质端元碎屑沉积物中重矿物组合存在明显差异。长江上游及支流对长江中下游沉积物贡献较弱,中下游源岩类型主要为岩浆岩和变质岩,研究表明长江中下游与长江水下三角洲矿物组合特征相同,基本以角闪石-绿帘石-金属矿物组合为特征^[40-42];黄河上游有少量花岗岩和变质岩,但其入海的碎屑矿物主要来源于中游黄土和各个地质时代的沉积岩,沉积物重矿物以黑云母-角闪石-绿帘石组合为特征^[43];浙闽沿岸河流沉积物重矿物由高级变质岩、酸性岩浆岩及接触变质岩共同构成,重矿物组合为不透明铁矿类(磁铁矿、赤铁矿)-绿帘石-锆石-电气石-角闪石^[44];台湾河流域主要岩性为沉积岩,最大的特点就是锆石含量高,重矿物以锆石-金属矿物(赤褐铁矿等)组合特征为主^[45]。

由此可见,中国大陆河流入海沉积物典型的重矿物为磁铁矿、角闪石、绿帘石等,主要代表着岩浆岩和变质岩源区,台湾河流、长江和黄河沉积物中含量较高的重矿物分别为锆石、角闪石和云母类矿物。

为确定外陆架重矿物分布规律和划分矿物组合分区,选择代表性较强、含量较高的矿物或其组合作为变量进行Q型聚类分析。本次选择角闪石类、帘石类、金属矿物、云母类、ZTR(锆石、金红石和电气石)、石榴石、楣石、辉石、岩屑9种矿物类型为变量,这9种矿物类型占碎屑重矿物总量的95.2%(表2)。

根据计算机程序软件(SPSS)计算处理后的聚类树形图(省略)结果,当聚类为五类时,样品才开始有明显的分区,表明研究区外陆架沉积物来源的一致性。对重矿物进行2—4类的聚类分析,外陆架区样品只有2—7个样品归为一类,其余样品矿物类型保持整体一致,矿物组合稳定,与长江沉积物矿物组合具有很高的相似性,研究区外陆架砂质沉积物应主要源于长江。

研究区外陆架沉积物样品重矿物中磁铁矿含量平均为1.4%,锆石平均含量为0.2%,黑云母含量为0.07%,与浙闽沿岸河流、台湾山溪性河流、黄河沉积物中矿物组成相差甚远。根据前人研究结果,浙闽沿岸河流沉积物重矿物中磁铁矿平均含量约为30.9%^[44],台湾山溪性小河流沉积物重矿物中锆石平均含量约为15.9%^[45],黄河沉积物重矿物中黑

云母平均含量约为47.4%^[43],均与本研究重矿物鉴定结果相差较大。

根据对外陆架沉积物测年的结果和最近的一些研究^[15,46-47],外陆架粗颗粒的沉积物并不是现代沉积,而是冰期低海平面时期的产物。在低海平面时期,古长江口向外延伸,在外陆架堆积了大量的沉积物,随着海平面上升,长江河口后退,新形成的台湾暖流和黑潮不断对其冲刷改造、淘洗,使得密度较小的矿物和近代细颗粒沉积物等组分搬离,难以在外陆架沉积下来。

4 结论

(1)研究区的外陆架→陆坡→海槽沉积物稀土元素和大部分主微量元素含量整体上表现为逐渐升高趋势,受“粒度控制”规律明显。

(2)海槽、陆坡、外陆架沉积物稀土元素标准化配分模式的结果表明,研究区海槽和陆坡的表层沉积物稀土元素配分模式与台湾沉积物类似,表现为中稀土相对富集;而外陆架沉积物稀土元素配分模式与长江、黄河沉积物类似,表现为明显的重稀土亏损。La/Sm-Gd/Yb散点图也显示海槽和陆坡沉积物主要分布在台湾端元区域,而外陆架沉积物主要分布在长江、黄河端元区,个别落在浙闽沿岸河流区域,表明海槽和陆坡沉积物主要来源于台湾物质的输入,而外陆架沉积物主要源于大陆河流的输入。

(3)对外陆架区沉积物重矿物分析鉴定的结果表明,外陆架沉积物重矿物组合稳定,物质来源一致,与长江重矿物组合模式非常相似。分析对比长江、黄河、浙闽沿岸河流、台湾各端元典型重矿物以及外陆架沉积物重矿物组合,发现外陆架沉积物中磁铁矿(代表浙闽沿岸河流)、黑云母(代表黄河)、锆石(代表台湾河流)含量均相对较低,与以角闪石-绿帘石-金属矿物组合为特征的长江沉积物一致,进一步表明其物质组成主要源于长江。根据前人对外陆架沉积物测年结果,以及对东海现代环流系统形成的研究,外陆架沉积物应为古长江物质经不断改造而成。

致谢: 感谢2015年海洋区域地质调查航次的全体科学家和船员的取样工作。

参考文献 (References)

[1] Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of

- river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1-2): 37-45.
- [2] 杨文达, 王振宇, 曾久岭. 冲绳海槽轴线地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 1-6. [YANG Wenda, WANG Zhenyu, ZENG Jiuling. Geologic features of the Okinawa trough Axis [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(2): 1-6.]
- [3] 赵月霞, 刘保华, 李西双, 等. 东海陆坡海底峡谷—扇体系沉积特征及物质搬运[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 119-126. [ZHAO Yuexia, LIU Baohua, LI Xishuang, et al. Sedimentary characters and material transportation of submarine canyon-fan systems in slope of the East China Sea [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 119-126.]
- [4] Milliman J D, Qin Y S, Park Y A. Sediments and sedimentary processes in the Yellow and East China Seas[M]//Taira A, Masuda F. Sedimentary Facies in the Active Plate Margin. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1989: 233-249.
- [5] Saito Y, Katayama H, Ikehara K, et al. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 122(1-4): 217-232.
- [6] Yoo D G, Lee C W, Kim S P, et al. Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf [J]. *Marine Geology*, 2002, 187(3-4): 313-328.
- [7] Liu Z X, Berné S, Saito Y, et al. Internal architecture and mobility of tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(13): 1820-1834.
- [8] Dou Y G, Yang S Y, Liu Z X, et al. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions [J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1-4): 212-220.
- [9] Jian Z M, Wang P X, Saito Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184(1): 305-319.
- [10] 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等. 冲绳海槽中南部及其邻近陆架悬浮体的分布、组成和影响因子分析[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 66-72. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, LEI Kun, et al. The distribution and composition of suspended matters and their influencing factors in the central-southern area of Okinawa Trough and its adjacent shelf sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(1): 66-72.]
- [11] 杨宝菊, 吴永华, 刘季花, 等. 冲绳海槽表层沉积物元素地球化学及其对物源和热液活动的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 25-37. [YANG Baoju, WU Yonghua, LIU Jihua, et al. Elemental geochemistry of surface sediments in Okinawa Trough and its implications for provenance and hydrothermal activity [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 25-37.]
- [12] 胡思谊, 曾志刚, 殷学博, 等. 冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 39(1): 69-82. [HU Siyi, ZENG Zhigang, YIN Xuebo, et al. Characteristics of rare earth elements in the sediment cores from the Okinawa Trough and their implications for sediment provenance [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 39(1): 69-82.]
- [13] 窦衍光, 陈晓辉, 李军, 等. 东海外陆架-陆坡-冲绳海槽不同沉积单元底质沉积物成因及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 21-31. [DOU Yanguang, CHEN Xiaohui, LI Jun, et al. Origin and provenance of the surficial sediments in the subenvironments of the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 21-31.]
- [14] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21(1): 169-200.
- [15] Vital H, Statterger K, Garbe-Schonberg C D. Composition and trace-element geochemistry of detrital clay and heavy-mineral suites of the lowermost Amazon River: a provenance study [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(3): 563-575.
- [16] Xu Z K, Li T G, Chang F M, et al. Sediment provenance discrimination in northern Okinawa Trough during the last 24 ka and paleoenvironmental implication: rare earth elements evidence [J]. *Journal of Rare Earths*, 2012, 30(11): 1184-1190.
- [17] Machida H. The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan [J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 21(1-3): 71-94.
- [18] 翟世奎, 于增慧, 杜同军. 冲绳海槽中部现代海底热液活动在沉积物中的元素地球化学记录[J]. 海洋学报, 2007, 29(1): 58-65. [ZHAI Shikui, YU Zenghui, DU Tongjun. Elemental geochemical records of modern seafloor hydrothermal activities in sediments from the central Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(1): 58-65.]
- [19] Iseki K, Okamura K, Kiyomoto Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 457-473.
- [20] Katayama H, Watanabe Y. The Huanghe and Changjiang contribution to seasonal variability in terrigenous particulate load to the Okinawa Trough [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 475-485.
- [21] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [22] Yang S Y, Wang Z B, Dou Y G, et al. A review of sedimentation since the last glacial maximum on the continental shelf of Eastern China [J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2014, 41(1): 293-303.
- [23] 张丹丹, 曾志刚, 殷学博. 冲绳海槽中部沉积物物质来源和沉积环境分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 92-101. [ZHANG Dandan, ZENG Zhigang, YIN Xuebo. Analysis on sediment provenance and environmental changes in the middle Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(7): 92-101.]
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell, Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1-190.
- [25] Sholkovitz E R, Elderfield H, Szymczak R, et al. Island weathering: river sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean [J]. *Marine Chemistry*, 1999, 68(1-2): 39-57.
- [26] Piper D Z, Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions [J]. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2013, 4(10A): 69-83.

- [27] 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.
- [28] Chen J C, Lo C Y, Lee Y T, et al. Mineralogy and chemistry of cored sediments from active margin off southwestern Taiwan [J]. *Geochemical Journal*, 2007, 41 (5): 303-321.
- [29] 尚鲁宁, 陈磊, 张训华, 等. 冲绳海槽南部海底热液活动区地形地貌特征及成因分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 39 (4): 12-22. [SHANG Luning, CHEN Lei, ZHANG Xunhua, et al. Topographic features of the hydrothermal field and their genetic mechanisms in southern Okinawa Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 39 (4): 12-22.]
- [30] 蔡宗伟, 翟世奎, 于增慧, 等. 冲绳海槽中、南部热液活动区金属硫化物的地球化学特征[J]. *海洋科学*, 2018, 42 (11): 73-82. [CAI Zongwei, ZHAI Shikui, YU Zenghui, et al. Geochemical characteristics of hydrothermal sulfide from the middle and southern hydrothermal fields in the Okinawa Trough [J]. *Marine Sciences*, 2018, 42 (11): 73-82.]
- [31] 金贵娥, 洪小燕, 汪厦霞, 等. 九龙江河口区稀土元素地球化学特征[J]. *台湾海峡*, 2010, 29 (3): 304-313. [JIN Guie, HONG Xiaoyan, WANG Xiaxia, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in Jiulongjiang Estuary [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29 (3): 304-313.]
- [32] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin [J]. *Lithos*, 2000, 54 (3-4): 118-137.
- [33] Dou Y G, Yang S Y, Shi X F, et al. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka: Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic evidences [J]. *Chemical Geology*, 2016, 425: 93-109.
- [34] Wang J Z, Li A C, Xu K H, et al. Clay mineral and grain size studies of sediment provenances and paleoenvironment evolution in the middle Okinawa Trough since 17 ka [J]. *Marine Geology*, 2015, 366: 49-61.
- [35] Chen C T A, Kandasamy S, Chang Y P, et al. Geochemical evidence of the indirect pathway of terrestrial particulate material transport to the Okinawa Trough [J]. *Quaternary International*, 2016, 441: 51-61.
- [36] 陈静, 王哲, 王张华, 等. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27 (5): 700-708. [CHEN Jing, WANG Zhe, WANG Zhanghua, et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang river delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (5): 700-708.]
- [37] 张凯棣, 李安春, 董江, 等. 东海表层沉积物碎屑矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. *沉积学报*, 2016, 34 (5): 902-911. [ZHANG Kaili, LI Anchun, DONG Jiang, et al. Detrital mineral distributions in surface sediments of the East China Sea: implications for sediment provenance and sedimentary environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34 (5): 902-911.]
- [38] Garzanti E, Andò S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands [J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 741-763.
- [39] Heroy D C, Kuehl S A, Goodbred S L Jr. Mineralogy of the Ganges and Brahmaputra Rivers: implications for river switching and Late Quaternary climate change [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 155 (3-4): 343-359.
- [40] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2006, 24 (4): 570-578. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, LI Ping, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24 (4): 570-578.]
- [41] 窦衍光, 王昆山, 王国庆, 等. 长江水下三角洲沉积物碎屑矿物研究[J]. *海洋科学*, 2007, 31 (4): 22-26, 31. [DOU Yanguang, WANG Kunshan, WANG Guoqing, et al. Research of detrital minerals in the sediment of sub-aqueous Yangtze Delta [J]. *Marine Sciences*, 2007, 31 (4): 22-26, 31.]
- [42] Yang S Y, Wang Z B, Guo Y, et al. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35 (1): 56-65.
- [43] 林晓彤, 李巍然, 时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23 (3): 17-21. [LIN Xiaotong, LI Weiran, SHI Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River Provenance, China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23 (3): 17-21.]
- [44] 陈心怡, 黄奇瑜, 邵磊. 福建闽江和九龙江现代沉积物重矿物特征及其物源意义[J]. *古地理学报*, 2018, 20 (4): 637-650. [CHEN Xinyi, HUANG Qiyu, SHAO Lei. Characteristics of heavy minerals in modern sediments of Minjiang and Jiulongjiang Rivers, Fujian Province and their provenance implication [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20 (4): 637-650.]
- [45] 邓凯, 杨守业, 王中波, 等. 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34 (3): 531-542. [DENG Kai, YANG Shouye, WANG Zhongbo, et al. Detrital heavy mineral assemblages in the river sediments from Taiwan and its implications for sediment provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34 (3): 531-542.]
- [46] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43 (6): 1039-1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: Indication for sedimentary environments [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43 (6): 1039-1049.]
- [47] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 121-155. [CHEN Lirong. *Sedimentary Mineralogy of the China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 121-155.]