

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017082301

冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示

胡思谊^{1,2}, 曾志刚^{1,2,3}, 殷学博¹, 朱博文^{1,2}, 方雪^{1,2}, 齐海燕¹

1.中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2.中国科学院大学, 北京 100049

3.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 266237

摘要: 通过对比研究了冲绳海槽南部、中部、北部岩心沉积物的稀土元素(REEs)组成和分异特征, 揭示了冲绳海槽不同区域的物源差异。由于火山物质和周围河流携带的陆源物质贡献程度不同, 各岩心沉积物 REE 组成存在显著差异。 Σ REE、 Σ LREE 具由南至北递减的趋势, 北部具相对更高的 Σ HREE, 南部次之。LREEs 与 HREEs 间的分馏程度, LREEs、HREEs 内部分馏程度均由南至北依次减小。从粒度、微量元素和稀土特征参数的垂向变化来看, 岩心 S3 物源相对单一, 沉积环境随时间变化较小, 主要受长江和台湾河流沉积物控制。岩心 S10、S9 沉积物来源更为复杂多样(特别是 S9), 沉积环境在时间尺度上发生了较大的变迁。岩心 S10 层位 1 主要受黄河和长江沉积物控制, 层位 2 具黄河沉积物和火山物质混合的特征, 岩心 S9 层位 1 是黄河沉积物和火山物质混合的结果, 层位 2 主要受黄河沉积物控制。

关键词: 稀土元素; 沉积物来源; 特征参数; 冲绳海槽

中图分类号: P736.4 **文献标识码:** A

Characteristics of rare earth elements in the sediment cores from the Okinawa Trough and their implications for sediment provenance

HU Siyi^{1,2}, ZENG Zhigang^{1,2,3}, YIN Xuebo¹, ZHU Bowen^{1,2}, FANG Xue^{1,2}, QI Haiyan¹

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: Multiple provenances are confirmed in the Okinawa Trough by a comparative study of the composition and fractionation of rare earth elements (REEs) in the sediment cores from southern, middle, and northern parts of the Trough. Distinctive differences in REEs compositions are discovered in different cores due to the different contribution of terrigenous detrital sediments from surrounding rivers and volcanic sources. The values of Σ REE and Σ LREE decrease from south to north, whereas Σ HREE values are relatively high in the north and followed by the south as the next. The fractionation degree between LREEs and HREEs, and the internal fractionation degrees of LREEs and HREEs decrease from south to north. The vertical variations in grain size, trace elements and REE characteristic parameters suggest that the sediment provenance of Core S3 was rather simple and the depositional environment was relatively stable. It is mainly controlled by terrigenous materials from the Yangtze River and Taiwan rivers. However, the sediment provenance of Core S10 and Core S9 are quite complicated, especially in the core of S9. Provenance changes remarkably with time. Layer 1 of Core S10 principally came from both the Yangtze River and Yellow River, while the Layer 2 has the mixed characteristics of volcanic materials and Yellow River sediments; The Layer 1 of Core S9 is the mixed deposits of volcanic materials and the Yellow River sediments, whereas the Layer 2 is mainly derived from the terrigenous particulate matters from the Yellow River.

资助项目: 国家自然科学基金项目“海底热液活动研究”(41325021); 全球变化与海气相互作用专项“菲律宾板块西边界及东南边界俯冲系统的岩浆构造演化”(GASI-GEOGE-02); 国家重点基础研究发展计划“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目“冲绳海槽热液活动成矿机理及其沉积效应”(133137KYSB20170003); 泰山学者工程专项(ts201511061); 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目(2015ASTP-0S17); 创新人才推进计划(2012RA2191); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03, 2016ASKJ13)

作者简介: 胡思谊(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋地球化学研究, E-mail: niudun2901@163.com

通讯作者: 曾志刚(1968—), 男, 研究员, 主要从事海洋地球化学研究, E-mail: zgzheng@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-08-23; **改回日期:** 2018-02-26. 周立君编辑

Key words: rare earth elements; sediment provenance; characteristic parameters; Okinawa Trough

冲绳海槽位于东海大陆架东南侧和琉球岛弧西北侧之间(图1),是一个形成于琉球沟-弧体系之后的新生陆内海盆^[1,2]。由于晚第四纪以来的连续沉积作用,海槽为一层巨厚沉积物所覆盖,记录了大量海洋环境变化和沉积物源演化方面的重要信息,是研究西太平洋边缘海陆-海相互作用、古环境变化的理想区域^[3,4]。

近年来,为了研究冲绳海槽沉积物的组成和来源,学者们尝试用各种研究方法进行了诸多探讨,主要包括磁性矿物学^[5]、黏土矿物学^[6-10]、元素和同位素地球化学^[3,4,11,12]等方法。地球化学研究方面,主要集中于沉积物的稀土元素(REEs)地球化学特征研究。在过去的几十年里,由于稀土元素具有独特的地球化学性质,被学者们作为指示地表化学过程强有力的示踪剂^[13,14]。其在海洋环境方面的应用非常广泛,包括河口水体向海洋输入的陆源物质、海洋循环和海底热液过程等研究^[13,15-18]。同时,稀土元素可以用来指示沉积物源^[19-21]。海洋沉积物中稀土元素含量主要受控于物源和矿物学特征,化学风

化影响程度较小^[19],粒度和生物物质的影响程度也非常有限^[22,23]。因此,利用稀土元素示踪不同背景下沉积物的来源是切实可行的。

关于冲绳海槽沉积物稀土元素地球化学特征研究的报道非常多,包括表层沉积物^[24,25],柱状沉积物^[12,26-28]。这些研究认为海槽中沉积物稀土元素特征主要受沉积物组成所控制,沉积物主要由陆源物质、火山物质和生物碎屑组成,陆源物质主要包括中国大陆河流和台湾河流携带的陆源碎屑等。然而,这些认识主要来源于表层沉积物的研究,岩心沉积物研究主要集中在冲绳海槽中部或北部小区域内,缺乏对整个冲绳海槽岩心沉积物的高分辨率对比性研究。因此,本文以冲绳海槽南部沉积物岩心S3为主要研究对象,与中部和北部岩心沉积物(S10和S9岩心)的稀土元素进行对比,探讨三者之间的REEs特征差异,然后与潜在源区物质的REEs参数进行综合性比较,进而从REEs地球化学的角度深度揭示不同源区物质对海槽南部、中部和北部沉积物的贡献程度差异,不同区域沉积环境的差异。

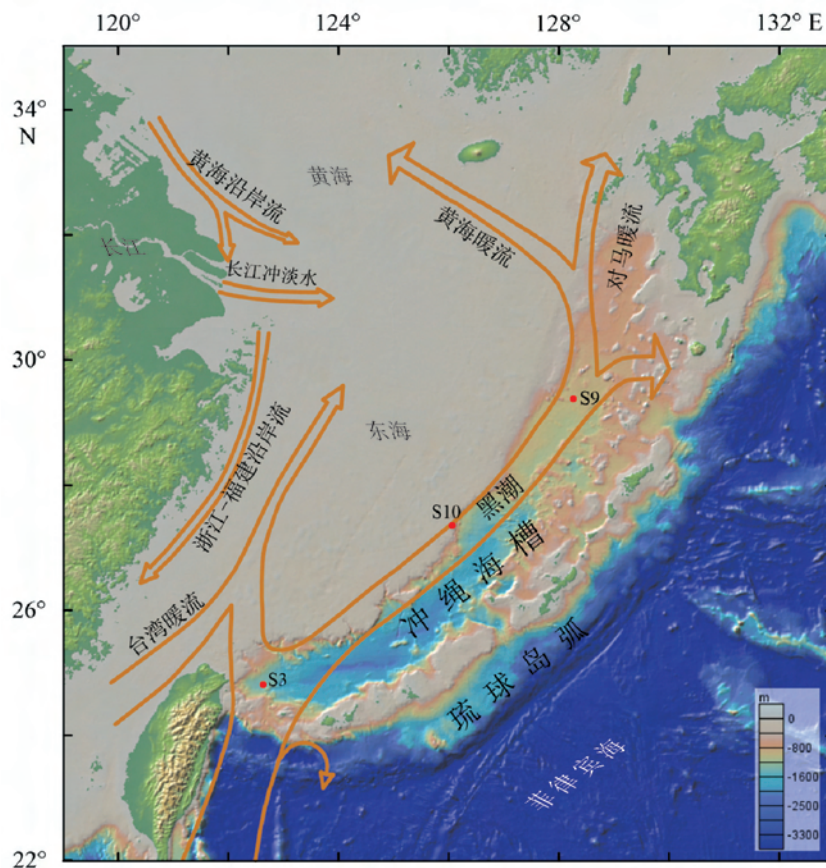


图1 冲绳海槽 S3、S10 和 S9 岩心站位图(洋流模式据文献[4]修改)

Fig.1 Location map of Cores S3, S10 and S9 in the Okinawa Trough (oceanic circulations modified after reference [4])

1 样品和分析方法

本文所选用的沉积岩心 S3 是由中国科学院海洋研究所的“科学号”考察船于 2016 年 6 月在冲绳海槽南部陆坡用重力活塞取样器获取的。岩心 S3 (24°49′25.34″N、122°37′58.87″E,水深 1351m)总长 420cm,整体呈青灰色,主要由粉砂和黏土组成,未见明显的火山灰夹层,但在底部出现了砂含量高且颜色较深的特殊层位(分别在 313~315cm 和 388~390cm),其他层位由顶部至底部沉积物颜色无明显变化(图 2)。

为获取岩心 S3 的粒度数据,以 2cm 为间隔取样,共对 210 个样品进行了粒度分析。在分析前,分别用 15% 的 H_2O_2 、20% 的醋酸,对沉积物进行前处理,有效去除沉积物中的有机质、碳酸盐^[9],然后上机测试。分析所使用的仪器是中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室的激光粒度仪 Cilas 1190L,测试范围为 0.04~2500 μm ,分析精度优于 2%。为了确定粒度对各岩心元素的控制,同时引用了岩心 S10 和 S9 在该实验室测得的粒度数据(其中

S10 引用了 140 个数据,S9 引用了 226 个数据)^[29,30]。岩心 S10(27°22.02′N、126°04.08′E,水深 1474m)总长 280cm,主要由粉砂和黏土组成,颜色变化不大,整体呈深灰绿色。岩心 S9(29°23.50′N、128°15.82′E,水深 1062m)总长 251cm,由于在 226cm 层位开始结块严重,故本文重点研究 0~226cm 层位的样品。该岩心以黏土质粉砂为主,颜色无明显变化,整体呈灰绿色。

为获取沉积物岩心 S3 的微量元素和稀土元素组成,以 2cm 为间隔取样,共获得 210 个样品。取 2g 左右的沉积物全岩样置于洁净的小烧杯中,经 45℃ 恒温烘干后,利用 Retsch 行星式球磨仪将沉积物研磨成粉末(小于 200 目),称取粉末样品 40mg 于 Teflon 罐中,向罐中加入 1.5mL 氢氟酸和 0.5mL 硝酸,加盖密封后置于电热板上,以 150℃ 加热 24h 后开盖蒸干,然后加入 1mL 硝酸溶解残余物,再次蒸干。待冷却至室温后,向 Teflon 罐中分别加入 1mL 去离子水和 1mL 硝酸,置于加热板上 150℃ 加热 12h 使样品完全溶解后,用去离子水稀释至约 40g,准备上机测试。各样品的微量元素和稀土元素(La-Lu)含量由 ICP-MS 测得,分析测试在中国科学

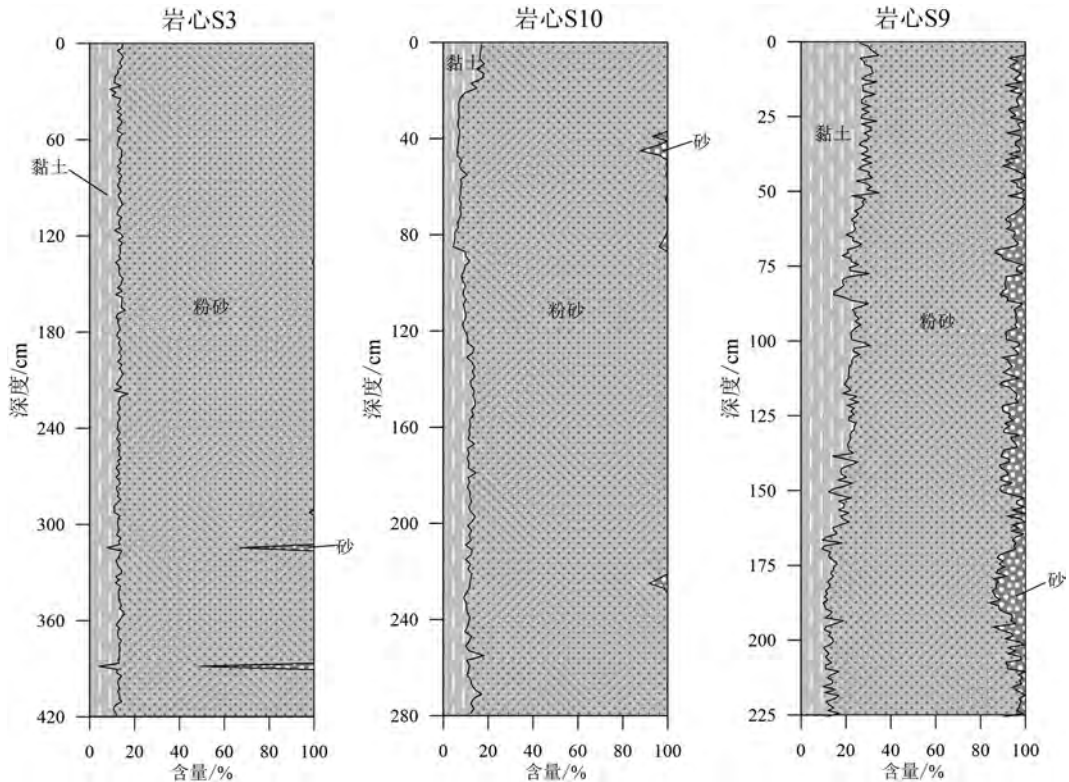


图 2 岩心 S3、S10^[29] 和 S9^[30] 沉积物类型剖面
Fig.2 Column diagrams of Cores S3, S10^[29] and S9^[30]

院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室完成。本文选取了美国地质调查局提供的 BCR-2、BHVO-2 和中国大洋矿产资源研究与开发协会提供的 GBW07316、GBW07315 作为标准物质,以保证测试分析结果的可靠性,测试过程中每隔 10 个样品测一个重复样,样品的分析精度通常优于 5%。此外,本文引用了之前在该实验室用类似方法测得的冲绳海槽中部和北部岩心沉积物 S10、S9 的稀土元素和部分微量元素数据(其中 S10 引用了 280 个层位的数据, S9 引用了前 226 个层位的数据)^[29,30],以探讨海槽不同区域岩心沉积物的稀土特征和微量元素组成差异。并结合前人研究的长江、黄河和台湾河流沉积物及火山物质中的稀土元素数据^[22,31-33],揭示海槽不同区域沉积物的来源差异和沉积环境变化。

2 结果

2.1 粒度组成特征

岩心 S3、S10 和 S9 沉积物类型剖面图如图 2。岩心 S3 和岩心 S10 类似,主要由黏土和粉砂组成,只有少数层位出现了砂,沉积物类型主要为黏土质粉砂。岩心 S3 在底部的 313~315cm 和 388~390cm 层位砂含量显著增加,初步判断为两个较小的浊流沉积层^[34],其他层位黏土和粉砂含量仅在小范围内变化,其中黏土含量为 9.04%~17.00%,均值为 13.08% ($n=208$),粉砂含量为 83.00%~90.96%,均值为 86.90% ($n=208$)。岩心 S10 在 20~90cm 层位黏土含量略低于其他层位,黏土和粉砂含量变化范围略大于 S3,其中黏土含量为 4.47%~18.30%,均值为 10.86% ($n=140$),粉砂含量为 80.18%~94.60%,均值为 88.76% ($n=140$)。岩心 S9 黏土和砂含量明显较 S3 和 S10 高,从顶部至底部黏土含量有降低的趋势,变化范围为 9.40%~34.73%,粉砂含量为 61.71%~87.46%,几乎所有层位均有砂存在,且上半段略低于下半段,平均含量为 6.04% ($n=226$) (图 2)。

各岩心平均粒径差异较大(图 3)。岩心 S3 除两个浊流层平均粒径较大外^[34],平均粒径自上而下均在小范围内变化,介于 11.18~19.33 μm 之间(图 3a)。岩心 S10 粒径变化范围略大于 S3,为 11.13~29.27 μm ,S10 上部各层位平均粒径较下部层位高(图 3b)。岩心 S9 平均粒径由底部至顶部有逐渐降低的趋势,平均粒径变化范围为 6.61~22.48 μm (图 3c)。

2.2 微量元素组成特征

岩心 S3、S10 和 S9 中微量元素 Th、Sc、Nb、Ta、Zr、Hf 随深度变化如图 3。结合各岩心的粒度数据和稀土特征参数变化,岩心 S3 可分为 3 个层位(图 3a):层位 1(420~314cm),层位 2(314~142cm),层位 3(142~0cm)。岩心 S10 可以分为两个层位(图 3b):层位 1(280~88cm),层位 2(88~0cm)。岩心 S9 可以分为两个层位(图 3c):层位 1(226~80cm),层位 2(80~0cm)。

岩心 S3 中的 Th、Sc、Nb、Ta 含量具有一致的变化特征,在层位 1 缓慢增大,而层位 2 和 3 中无明显变化。Zr、Hf 变化趋势类似,层位 1 中缓慢递增,层位 2 和层位 3 中较为稳定,但是层位 3 的含量整体较层位 2 低。值得一提的是,在浊流层 1 中各微量元素含量明显降低,在浊流层 2 中则与相邻层位相近(图 3a)。

岩心 S10 中的 Th、Nb、Ta 含量随深度变化特征类似,在层位 1 中间部分略高,整体在小范围内波动,而层位 2 由下至上具有明显的递增趋势。Zr、Hf 的变化趋势极为相似,层位 1 由下至上两元素的含量无明显变化,而层位 2 具有明显递减的趋势。S10 中的 Sc 在层位 1 中变化较小,在层位 2 中表现为先增后减的特征(图 3b)。

岩心 S9 中的 Th、Nb、Ta 含量垂向变化特征类似,在层位 1 中的含量整体低于层位 2,在层位 2 中的变化范围明显较层位 1 小。Zr、Hf 变化特征与 Th、Nb、Ta 相反,在层位 2 中的含量整体较层位 1 低,且两元素含量在层位 2 中的波动范围小于层位 1。除个别样品外,Sc 含量在 S9 中整体变化不大(图 3c)。

2.3 REEs 组成特征

本文将稀土元素分为两组,其中 La-Eu 为轻稀土元素(LREEs),轻稀土总量用 $\sum\text{LREE}$ 表示, Gd-Lu 为重稀土元素(HREEs),重稀土总量用 $\sum\text{HREE}$ 表示。稀土元素(La-Lu)总量则用 $\sum\text{REE}$ 表示。岩心 S3 中 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 和 $\sum\text{HREE}$ 随深度变化具有类似趋势(图 3a),均表现为层位 1 缓慢递增,层位 2 和层位 3 在小范围内波动,而层位 3 整体上略低于层位 2。岩心 S10 中 $\sum\text{REE}$ 和 $\sum\text{LREE}$ 变化趋势一致,层位 1 由底部至顶部先小范围波动,随后有缓慢递减的趋势,而在层位 1 中又缓慢增加, $\sum\text{HREE}$ 在层位 1 中变化较为稳定,在层位 2 则有显著下降的趋势(图 3b)。岩心 S9 中

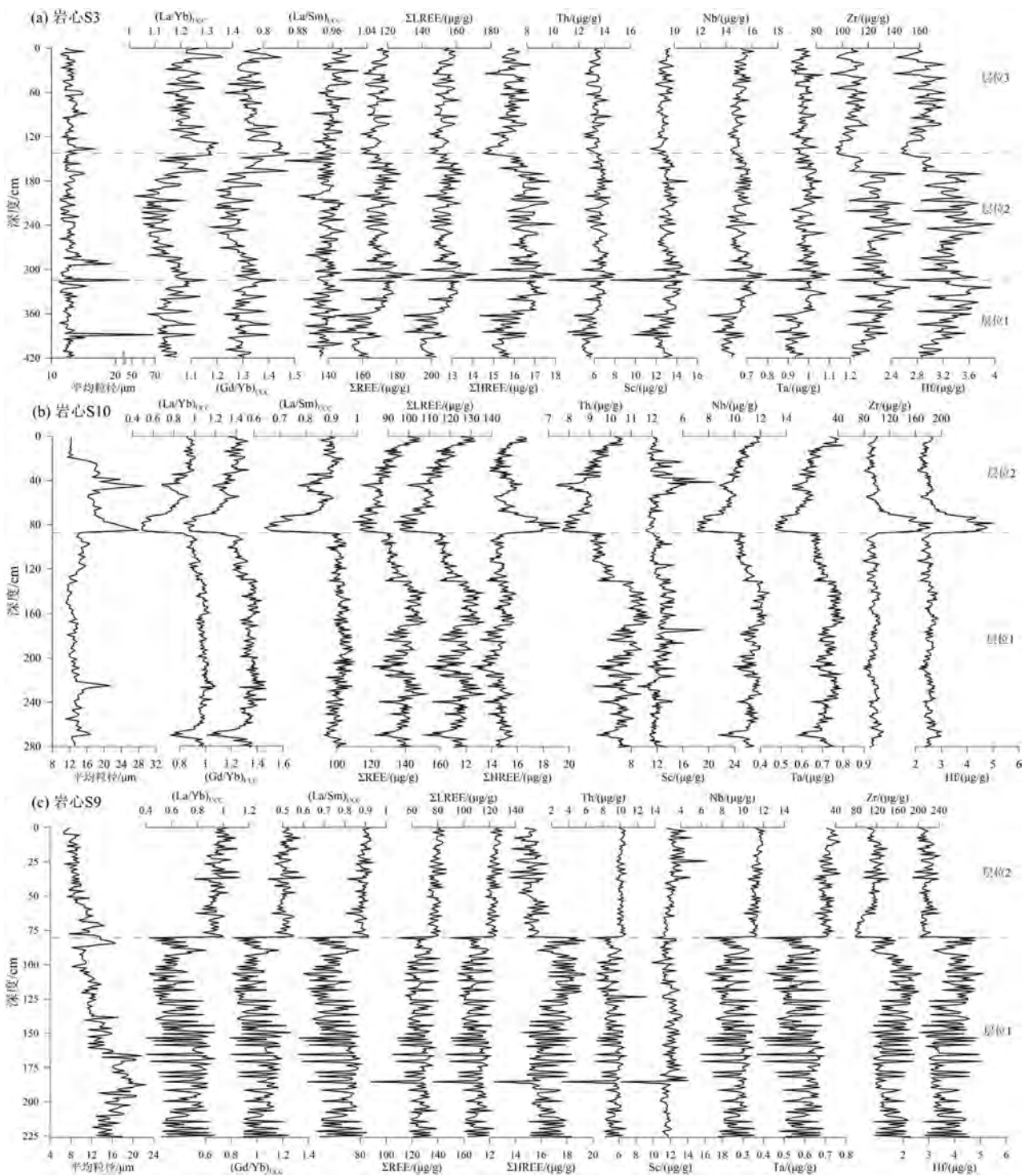


图 3 岩心 S3、S10^[29] 和 S9^[30] 的平均粒径、稀土参数和微量元素垂向变化图解

Fig.3 Vertical changes in mean grain size, REE indices and trace elements of Core S3, S10^[29] and S9^[30]

Σ REE 和 Σ LREE 具类似的垂向变化特征,层位 1 整体略低于层位 2,层位 2 的变化范围明显小于层位 1,而 Σ HREE 在层位 1 中整体高于层位 2(图 3c)。

S3、S10、S9 岩心沉积物的稀土元素组成变化如表 1 所示。Ce、La、Nd 与其他元素相比含量相对较高,轻稀土元素相对于重稀土元素更为富集。各岩

心平均稀土元素总量具有一定的规律性(表 2), Σ REE 由南至北依次为 168.06、134.30、130.13 $\mu\text{g/g}$, Σ LREE 由南至北依次为 151.93、119.39、113.85 $\mu\text{g/g}$,均为由南至北递减。而 Σ HREE 在北部最高 (16.28 $\mu\text{g/g}$),南部次之(16.13 $\mu\text{g/g}$),中部的 Σ HREE(14.92 $\mu\text{g/g}$)最低。数理统计分析结果

表明,除 Sm、Eu、Gd 等元素外,各岩心沉积物 REEs 含量的标准偏差(表 1)表现为从南部到北部依次递增的趋势,结合各岩心沉积物 REEs 含量的极值变化范围可以看出南部的岩心沉积物 REEs 含量变化更为集中,而北部的最为分散。 Σ LREE- Σ HREE 图解可以很好地反映这些特征(图 4a)。

各岩心沉积物的 REEs 含量与潜在源区长江、黄河、台湾河流表层沉积物及火山物质代表(海槽岩

石)的 REEs 含量相比可以看出(表 2):岩心 S3 的平均 Σ REE、 Σ LREE 低于台湾河流^[32]和长江表层沉积物^[22,31],而高于黄河表层沉积物^[22,31]和海槽岩石^[33], Σ HREE 则低于海槽岩石、台湾河流和长江沉积物,略高于黄河沉积物;岩心 S10 除了 Σ REE、 Σ LREE 高于海槽岩石之外, Σ REE、 Σ LREE、 Σ HREE 均低于其他源区物质;S9 与 S10 类似,但其 Σ HREE 却高于黄河沉积物。

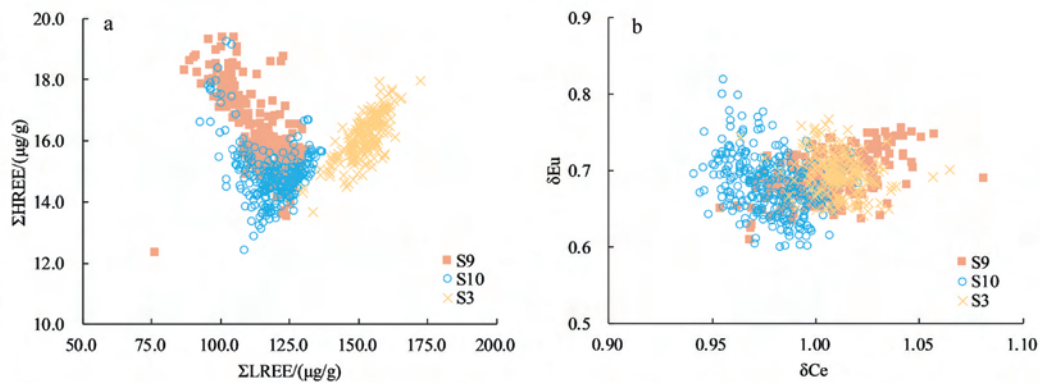


图 4 岩心 S3、S10^[29]、S9^[30] Σ LREE- Σ HREE 关系图(a)以及球粒陨石标准化后的 δ Ce- δ Eu 关系图(b)
(球粒陨石数据引自文献[35])

Fig.4 Relationships between Σ LREE and Σ HREE (a), and Chondrite normalized δ Ce and δ Eu (b) of Core S3, S10^[29], S9^[30]
(The chondrite data is from reference [35])

表 1 各岩心沉积物和潜在源区物质稀土元素组成(单位:μg/g)

Table 1 REEs compositions of sediments in different cores and possible sources

		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
南部 S3 (n=210)	最大值	41.26	80.44	9.09	33.31	6.52	1.41	5.81	0.86	4.55	0.98	2.67	0.42	2.58	0.39
	最小值	30.75	60.56	6.69	25.05	4.89	1.04	4.46	0.66	3.51	0.73	1.96	0.30	1.80	0.27
	平均值	36.10	71.23	7.97	29.72	5.70	1.23	5.09	0.76	4.06	0.88	2.38	0.37	2.25	0.34
	标准偏差	1.56	3.09	0.35	1.22	0.24	0.07	0.21	0.04	0.19	0.04	0.12	0.02	0.14	0.02
中部 S10 ^[29] (n=280)	最大值	33.05	63.65	7.30	27.21	5.39	1.23	5.40	0.91	4.89	1.13	3.19	0.52	3.31	0.51
	最小值	20.08	41.93	5.01	20.28	4.14	0.87	4.13	0.55	3.01	0.66	1.81	0.28	1.74	0.26
	平均值	28.57	54.62	6.33	24.07	4.74	1.05	4.68	0.68	3.69	0.81	2.22	0.35	2.17	0.33
	标准偏差	2.55	4.60	0.45	1.39	0.24	0.07	0.22	0.05	0.25	0.07	0.20	0.04	0.25	0.04
北部 S9 ^[30] (n=226)	最大值	31.59	60.20	6.86	26.19	5.30	1.24	5.35	0.90	5.02	1.14	3.15	0.54	3.43	0.52
	最小值	14.68	35.73	4.31	16.91	3.55	0.79	3.42	0.55	3.12	0.70	1.95	0.31	1.91	0.29
	平均值	26.07	52.48	6.06	23.30	4.85	1.08	4.70	0.74	4.07	0.91	2.51	0.41	2.56	0.39
	标准偏差	3.26	4.91	0.46	1.37	0.18	0.07	0.18	0.07	0.38	0.10	0.28	0.05	0.36	0.06
长江沉 积物 ^[22,31] (n=30)	最大值	44.18	89.73	9.87	37.53	7.27	1.47	6.80	0.95	5.41	1.13	3.13	0.42	2.85	0.41
	最小值	33.54	68.15	7.68	29.17	5.61	1.10	5.06	0.67	3.90	0.73	2.28	0.29	1.86	0.28
	平均值	39.92	80.34	9.05	34.26	6.60	1.32	5.91	0.85	4.66	0.96	2.76	0.37	2.41	0.36
黄河沉 积物 ^[22,31] (n=42)	最大值	51.92	106.09	12.27	45.62	8.29	1.32	7.81	1.01	5.95	1.13	3.53	0.50	3.43	0.50
	最小值	21.74	43.95	5.06	19.48	3.61	0.79	3.64	0.45	2.81	0.52	1.68	0.20	1.54	0.21
	平均值	32.47	64.86	7.88	28.87	5.35	1.05	5.22	0.68	4.09	0.80	2.37	0.33	2.21	0.32

续表 1

		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
台湾河流 沉积物 ^[32] (n=38)	最大值	76.13	143.70	15.82	54.00	8.58	1.83	8.95	1.16	7.00	1.34	3.97	0.64	4.11	0.67
	最小值	25.09	49.40	5.92	22.13	4.26	0.96	3.91	0.66	3.65	0.71	2.19	0.32	2.19	0.31
	平均值	41.08	81.38	9.18	34.48	6.24	1.31	6.07	0.88	5.02	0.95	2.85	0.43	2.83	0.43
海槽岩石 ^[33] (n=21)	最大值	25.56	56.52	6.94	28.29	6.70	1.77	6.90	1.22	8.02	1.77	5.44	0.88	5.82	0.91
	最小值	11.68	26.07	3.39	13.57	2.90	0.72	2.89	0.49	3.14	0.69	2.16	0.36	2.41	0.39
	平均值	18.37	39.77	4.87	19.80	4.70	1.18	4.89	0.84	5.39	1.18	3.60	0.58	3.82	0.61

表 2 各沉积物岩心和潜在源区物质稀土元素特征参数及异常指数

Table 2 Characteristic parameters and anomaly indexes of REEs in different sediment cores and possible sources

		Σ REE	Σ LREE	Σ HREE	LREE/ HREE	(La/Yb) _{UCC}	(La/Sm) _{UCC}	(Gd/Yb) _{UCC}	δ Ce	δ Eu
南部 S3 (n=210)	最大值	190.04	172.04	17.99	10.28	1.36	1.02	1.48	1.06	0.77
	最小值	143.72	129.39	13.69	8.76	1.02	0.85	1.17	0.96	0.64
	平均值	168.06	151.93	16.13	9.43	1.18	0.95	1.31	1.01	0.70
	标准偏差	6.88	6.32	0.73	0.30	0.07	0.02	0.06	0.01	0.03
中部 S10 ^[29] (n=280)	最大值	152.34	136.68	19.27	9.20	1.20	0.99	1.46	1.02	0.82
	最小值	109.21	92.60	12.45	5.29	0.49	0.64	0.83	0.89	0.60
	平均值	134.30	119.39	14.92	8.04	0.98	0.90	1.26	0.98	0.68
	标准偏差	8.83	9.05	0.93	0.81	0.15	0.06	0.13	0.02	0.04
北部 S9 ^[30] (n=226)	最大值	146.70	130.99	19.42	9.13	1.13	0.94	1.37	1.08	0.76
	最小值	88.34	75.97	12.37	4.74	0.41	0.58	0.79	0.95	0.61
	平均值	130.13	113.85	16.28	7.07	0.77	0.81	1.08	1.01	0.69
	标准偏差	9.17	10.00	1.34	1.06	0.18	0.09	0.14	0.02	0.03
长江沉积物 ^[22,31] (n=30)	最大值	210.92	189.93	20.99	10.13	1.42	0.97	1.57	1.04	0.70
	最小值	161.81	146.23	15.26	8.88	1.08	0.80	1.29	0.99	0.60
	平均值	189.78	171.50	18.27	9.39	1.22	0.91	1.42	1.02	0.65
黄河沉积物 ^[22,31] (n=42)	最大值	249.37	225.51	23.86	10.06	1.23	1.01	1.57	1.02	0.69
	最小值	106.49	94.64	11.05	7.99	0.92	0.84	1.16	0.93	0.50
	平均值	156.52	140.49	16.03	8.75	1.07	0.91	1.36	0.98	0.62
台湾河流沉积物 ^[32] (n=38)	最大值	323.07	300.06	25.90	13.04	1.84	1.33	1.52	1.06	0.79
	最小值	122.28	107.86	14.42	7.48	0.83	0.88	0.95	0.97	0.57
	平均值	193.12	173.67	19.46	8.88	1.06	0.98	1.25	1.01	0.66
海槽岩石 ^[33] (n=21)	最大值	155.56	125.53	30.87	5.61	0.49	0.84	0.92	1.03	0.97
	最小值	77.08	60.75	12.53	2.96	0.21	0.42	0.65	0.99	0.50
	平均值	109.59	88.68	20.91	4.41	0.37	0.62	0.74	1.01	0.76

2.4 REEs 分馏特征

轻重稀土元素的比值(Σ LREE/ Σ HREE)可以更简明地量化 REEs 的分馏状况^[14],各岩心沉积物的 Σ LREE/ Σ HREE 差异较大,变化趋势与平均 Σ REE 相同,从南部到北部轻重稀土分馏程度递

减,依次为 9.43、8.04 和 7.07。与潜在源区物质相比,S3 与长江沉积物(Σ LREE/ Σ HREE=9.39)相近,且高于其他源区的比值。而 S10 和 S9 仅高于海槽岩石(Σ LREE/ Σ HREE=4.41),却低于其他源区的比值(表 2)。

从球粒陨石标准化曲线(图 5a)可以看出所有

样品(除海槽岩石外)具有相似的 REEs 配分模式。整体呈向右倾斜的趋势,其中 La-Eu 段相对较陡,而 Eu-Lu 段相对较为扁平,海槽岩石的 HREEs 分布模式与其他样品相比最为平缓。所有样品均表现为 LREEs 富集、HREEs 亏损,两者富集程度存在差异,其中 LREEs 的富集程度:台湾河流>长江>S3>黄河>S10>S9>海槽岩石;HREEs 的富集程

度大致为:海槽岩石>台湾河流>长江>S9>S3>S10>黄河。岩心 S10 的 Eu 异常变化范围较大,为 0.60~0.82,S9 则 Ce 异常变化范围较大,为 0.95~1.08(表 2、图 4b),所有样品均表现为微弱的 Ce 异常,中等程度的 Eu 负异常(表 2),Eu 亏损程度依次为黄河(0.62)、长江(0.65)、台湾河流(0.66)、S10(0.68)、S9(0.69)、S3(0.70)、海槽岩石(0.76)。

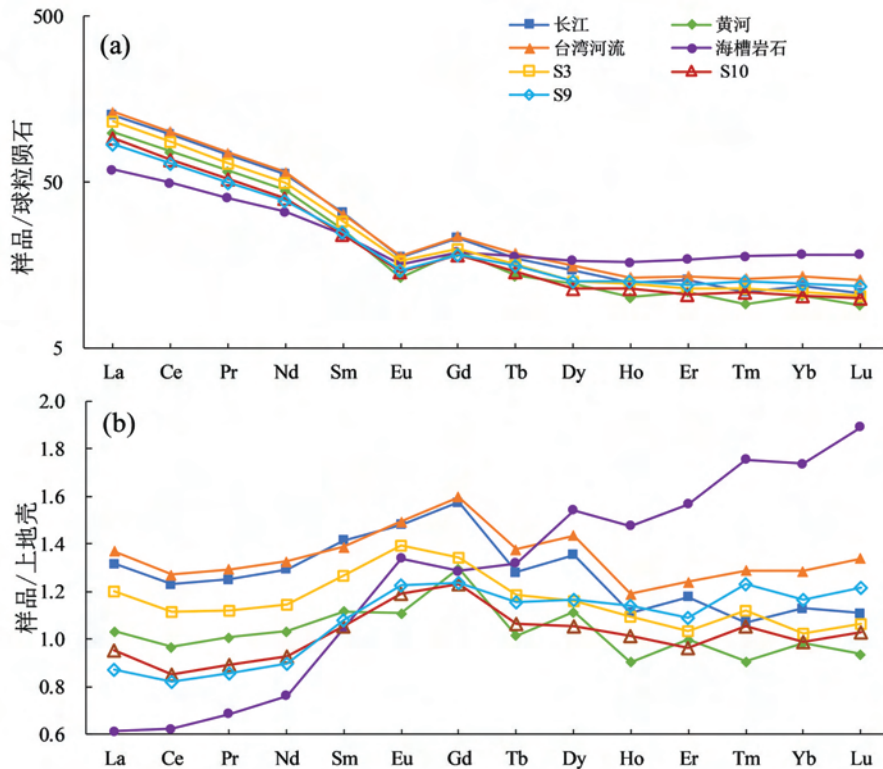


图 5 长江^[22]、黄河^[22]、台湾河流^[32]沉积物,S3、S10^[29]、S9^[30]

岩心沉积物和海槽岩石^[33]REEs 球粒陨石^[35]标准化图解(a)以及上地壳^[36]标准化图解(b)

Fig.5 Chondrite^[35]-normalized pattern(a); UCC^[36]-normalized pattern (b) of REEs in sediments from Yangtze River^[22], Yellow River^[22], Taiwan rivers^[32], Core S3, S10^[29], S9^[30], and rocks^[33] from the Okinawa Trough

从上地壳标准化曲线可以看出 S3 与长江、台湾河流类似,均相对于上地壳富集 REEs,而 S10、S9 与海槽岩石类似,均相对于上地壳亏损 LREEs,富集 HREEs,黄河沉积物除个别元素外 REEs 富集程度与上地壳相当(图 5b)。S3 同台湾河流、长江沉积物样品一样表现为 UCC 标准曲线中部相对凸起,相对富集 Sm、Eu、Gd、Tb 等中稀土元素,亏损两侧的 LREEs 和 HREEs,而 S9、S10 及海槽岩石标准化曲线呈左倾,LREEs 相对亏损、HREEs 相对富集,且 S9 比 S10 更富集 HREEs,相对而言黄河沉积物的 REEs 分馏情况不是很明显。上地壳标准化比值 $(La/Yb)_{UCC}$ 可以很好地表征 LREEs 和

HREEs 的分异程度, $(La/Sm)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 可以很好地反映 LREEs、HREEs 内部的分馏状况。岩心 S3 中 $(La/Yb)_{UCC}$ 和 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 随深度变化趋势相似,在层位 1 中小范围波动,层位 2 中略微减小后增加,层位 3 中有略微减小的趋势, $(La/Sm)_{UCC}$ 自下而上呈递增的趋势(图 3a)。岩心 S10 中 $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 和 $(La/Sm)_{UCC}$ 垂向变化特征类似,在层位 1 中较稳定,层位 2 中具有递增的趋势(图 3b)。岩心 S9 中的 $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 和 $(La/Sm)_{UCC}$ 具有一致的垂向变化特征,在层位 1 中的波动范围较层位 2 大,且整体数值较层位 2 小(图 3c)。岩心 S3 的 $(La/Yb)_{UCC}$ 变化范围为 1.02~

1.36,均值为 1.18;S10 的 $(La/Yb)_{UCC}$ 变化范围为 0.49~1.02,均值为 0.98;S9 的 $(La/Yb)_{UCC}$ 变化范围为 0.41~1.13,均值为 0.77(表 2)。各岩心沉积物 $(La/Yb)_{UCC}$ 变化范围由南至北增大,均值由南至北减小, $(La/Sm)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 等稀土参数具类似特征。 $(La/Yb)_{UCC}$ - $(Gd/Yb)_{UCC}$ 、 $(La/Yb)_{UCC}$ - $(La/Sm)_{UCC}$ 图解很好地反映了 S3、S10、S9 岩心沉积物的稀土特征差异,其稀土特征参数与潜在源区物质稀土特征参数的相似程度,很好地揭示了不同源区对各岩心沉积物的贡献程度差异(图 6)。

3 讨论

3.1 REEs 组成的控制因素

独特的地理位置,复杂的洋流系统(图 1),使得冲绳海槽沉积物具有多来源的特征^[37]。长期以来,许多学者就意识到进入冲绳海槽的陆源颗粒物主要来源于东海大陆架,这些沉积物主要来源于中国两大河流,长江和黄河^[3,38-42],而台湾河流也是海洋中陆源沉积物重要的供给者之一^[43]。中国大陆河流与台湾河流每年都会携带大量的陆源碎屑物从河口排泄到海洋中,长江、黄河和台湾河流每年排泄的陆源碎屑物分别为 470、1100 和 210Mt^[44]。前人通过沉积物捕获器实验研究证实了河流沉积物是海槽沉积物的重要来源^[40]。然而,除了周围河流输入的陆源碎屑物外,火山作用的产物^[45]、海底热液活动的产物^[11]、风携带的尘埃物质^[46] 等同样会对海槽沉积物做出贡献。源于海底火山喷发的火山物质,直接散落或者由海水、潮汐等搬运的日本列岛阶段性火山喷发的产物对冲绳海槽沉积物具有重要贡献,海槽中的火山沉积物横向和纵向上分布不均,具有明显的区域性和阶段性特征^[47]。因此,火山物质对冲绳海槽南部、中部、北部的贡献存在一定程度的差异。热液活动的产物,很大程度上会与陆源及其他来源的物质同时沉积,导致沉积物中某些元素发生不同程度的富集^[11]。本文所选冲绳海槽南部、中部和北部的样品与热液区有一定的距离,所测得的热液异常指示性元素(如 Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg)^[11] 无明显异常,因而可以认为热液物质对各岩心沉积物贡献可以忽略。低海平面时期大陆架外露,所形成的近端风成颗粒物通常粒径较大,且主要是河流携带累积在大陆架上的沉积物。这表明近端风成颗粒物可以忽略,或者视为进入海槽的河流沉积物^[4]。因此,本文并没有将亚洲沙尘视为重要的物质来源。

综合所有控制因素,沉积物源被视为稀土元素组成最重要的控制因素^[22,36]。除沉积物源外,影响沉积物中 REEs 组成的因素还包括源区基岩的成分、矿物组成、化学风化、成岩作用、粒度、人类的活动等^[3]。虽然石榴子石、榍石、褐帘石、锆石、独居石等矿物在沉积物中含量较低,但是这些矿物中的 REEs 含量较高^[36],使得沉积物中 REEs 总量发生显著分馏^[3]。然而,前人发现重矿物对长江、黄河沉积物中 REEs 的贡献仅有 10%~20%,化学风化对沉积物中 REEs 的影响甚微且几乎不会改变总的 REEs 模式^[22]。本文已将岩心 S9 结块严重的层位剔除,S3、S10 均为正常沉积物,因此可以忽略成岩作用对 REEs 组成的影响。一般认为 REEs 组成受粒度影响较大,REEs 通常在黏土和粉砂级组分中富集,在砂级组分中相对亏损,这主要是石英和碳酸盐矿物的稀释作用造成的^[19,48]。岩心 S3 的粒度与 ΣREE 随深度变化关系不明显(图 3a),相关性较弱($R^2=0.15$),说明 S3 的 REEs 组成受粒度效应的影响较小。岩心 S10 层位 1 粒度与 ΣREE 随深度分布有相反的趋势(图 3b),有一定的相关性($R^2=0.31$),层位 2 粒度与 ΣREE 垂向上呈一定的规律变化,有较明显的反相关关系($R^2=0.70$),说明粒度对层位 2 的 REEs 组成遵循粒度控制规律。岩心 S9 中层位 1、层位 2 平均粒径与 ΣREE 无明显随深度变化的规律(图 3c),相关性较弱($R^2=0.03$ 、 0.14),说明 S9 不遵循元素粒度控制规律。粒度可能是 S10 中 REEs 组成的重要控制因素之一,然而,蒋富清等^[27]通过对冲绳海槽岩心沉积物的研究,认为火山物质的加入会使得沉积物粒度增大,REEs 的含量降低,而 REEs 的最主要控制因素是沉积物的组分差异。

根据以上分析,我们认为河流提供的陆源物质和火山物质是海槽沉积物最主要的潜在物源,由于区域上的差异,各河流沉积物和火山物质对海槽沉积物的贡献程度不同,受各种控制因素的影响使得冲绳海槽不同区域的岩心沉积物 REEs 地球化学特征参数存在显著差异。各岩心沉积物样品均表现为 LREEs 相对于 HREEs 富集,且具有与长江、黄河、台湾河流沉积物非常相似的 REEs 分布特征(图 5),我们认为河流沉积物主导了冲绳海槽沉积物的 REEs 地球化学组成,是造成冲绳海槽岩心沉积物 REEs 特征差异的最重要因素。S10 和 S9 的 HREEs 变化特征与火山物质有一定的相似之处(图 5),说明火山物质的加入使得海槽沉积物继承了火山物质的部分 REEs 特征。

3.2 各岩心地球化学特征及来源差异

高场强元素(如 REEs、Th、Sc、Nb、Ta、Zr、Hf 等)在沉积过程中具有相对较弱的化学活动性且在海水中的滞留时间较短,可以用于反映初始物质的信息,判定物质来源^[49]。岩心 S3 中 Σ REE 与 Th、Nb、Ta 具有非常一致的垂向变化趋势(图 3),表现出显著的正相关关系($R^2 = 0.87, 0.92, 0.84$)。岩心 S10 和 S9 具有类似特征, R^2 分别为 0.93、0.94、0.93 和 0.87、0.90、0.91。Th、Nb、Ta 作为典型的陆源物质代表性元素,主要富集在复杂的陆源碎屑矿物组合中^[50],进一步说明各岩心沉积物主要是陆源的,稀土元素组成主要受陆源物质控制。岩心 S3 中 Zr、Hf 含量和 Σ REE、Th、Nb、Ta 随深度变化特征相似,很大程度上说明 S3 中 Zr、Hf 主要由陆源碎屑锆石提供,然而岩心 S10、S9 中 Zr、Hf 含量和 Σ REE、Th、Nb、Ta 随深度变化表现出截然相反的特征,说明 S10、S9 中锆石除了来自陆源碎屑外,还可能来自于火山物质^[29],火山物质对岩心 S10、S9 有一定的贡献。

Σ LREE- Σ HREE、 $\delta E_{u}-\delta C_{e}$ 和 UCC 标准化图解均可以看出冲绳海槽沉积物岩心 S3、S10、S9 的 REEs 存在较大差异。只有对潜在的不同源区和物质端元有全面且深入的认识,才能合理、可靠地解释沉积物物源^[4]。由于 REEs 在表生环境中具有高度保守的地球化学行为,中国大陆河流沉积物、台湾河流沉积物和火山物质的 REEs 存在显著特征差异,可以用来区分海洋沉积物的来源,推测相应的沉积模式、分散路径和不同源区物质对相邻海域海洋沉积物的贡献程度^[32]。前人对潜在源区的研究积累了大量的 REEs 数据^[22,31-33],本文希望以潜在源区样品 REEs 特征参数作为源区物质端元,示踪各岩心中沉积物的来源。其中,台湾河流沉积物 REEs 分馏程度相对较弱且较为发散,与中国大陆河流沉积物相比, $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 相对较低,而长江、黄河沉积物具有相对一致且较高的 $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 比值,长江沉积物 REEs 分馏略强于黄河沉积物,海槽火山物质的代表性物质海槽岩石各 REEs 分馏参数均较低。不同端元物质的 $(La/Yb)_{UCC}$ 、 $(La/Sm)_{UCC}$ 、 $(Gd/Yb)_{UCC}$ 等分馏参数存在差异,这些参数是识别海洋沉积物来源非常好的替代指标^[32]。

岩心 S3 不同层位间粒径、元素组成和稀土特征参数均在小范围内变化(图 2、图 3a、图 4),说明 S3 除了发生两次较小的浊流事件外^[34],整体上沉积环

境稳定,物源变化较小。其球粒陨石标准化图解表现出明显的陆源属性(图 5a),平均 Σ REE 介于台湾河流沉积物和长江沉积物之间(表 2),UCC 标准化图解具有与长江和台湾河流沉积物类似的变化趋势和富集特征(图 5b),说明台湾河流和长江携带的陆源物质可能是 S3 中沉积物的主要物源。岩心 S3 $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ 散点图主要落在长江区域,部分和台湾河流沉积物重合(特别是层位 2),与火山物质截然不同,同样说明台湾河流和长江沉积物是 S3 中沉积物的最主要来源。而 $(La/Yb)_{UCC}-(La/Sm)_{UCC}$ 图解中 S3 部分样品与黄河沉积物类似,对此我们有两个推论:其一,由于黄河和长江所携带的均为中国大陆碎屑物质, $(La/Yb)_{UCC}$ 和 $(La/Sm)_{UCC}$ 比值具有一定的相似性;其二,虽然黄河三角洲距离冲绳海槽南部较远,其物源特征尚存在争议^[4],近年来也有学者认为在现代的洋流循环体系下,黄河和中国黄土沉积物很难被搬运到冲绳海槽南部^[51],然而从 $(La/Yb)_{UCC}-(La/Sm)_{UCC}$ 图解来看,黄河输入的陆源物质对冲绳海槽南部沉积物是存在贡献的,有学者通过 Sr、Pb 同位素研究发现中国黄土(黄河沉积物重要来源之一)对冲绳海槽南部沉积物的贡献高达 30%^[52]。因此我们认为海槽南部岩心 S3 与附近 1202B 孔类似,无明显的火山碎屑和火山灰夹层^[53],S3 中的沉积物具混合来源特征,主要受长江和台湾河流控制^[4,6],可能存在黄河沉积物的影响,不同层位沉积物来源相对单一,沉积环境在时间尺度上变化较小。

岩心 S10 上部层位平均粒径较下部层位高(图 3b),说明两者之间沉积环境可能发生了较大程度的变迁。不同层位间元素组成和稀土特征参数变化范围较大(图 2、图 4),同样说明 S10 垂向上沉积环境发生了变化,不同层位物源存在差异。其球粒陨石标准化图解同样表现出显著的陆源属性(图 5a),平均 Σ REE 介于黄河沉积物和火山物质之间(表 2),UCC 标准化图解与黄河沉积物和海槽岩石有一定的相似性(图 5b),说明黄河携带的陆源碎屑可能是重要物源之一,而受钙质组分稀释作用的影响, Σ REE 低于源区物质,而 $(La/Yb)_{UCC}$ 值较低很可能是火山物质影响的结果。 $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ 和 $(La/Yb)_{UCC}-(La/Sm)_{UCC}$ 散点图可以看出不同层位间 REEs 特征参数变化具有较好的线性关系,且各参数投点具有明显靠近火山物质端元的趋势,海槽中部 DGKS9604 岩心同样观察到了火山物质的存在^[3],说明火山物质对海槽中部沉积物的影响是普遍存在的。S10 层位 1 主要落在黄河沉积物区

域,部分与长江物质重合,说明中国大陆物质是层位 1 中沉积物的主要来源。层位 2 与层位 1 差异较大,散点图介于黄河沉积物和火山物质之间,部分与台湾物质相似(图 6),我们推断层位 2 受火山物质影响较大,继承了火山物质部分 REEs 特征,其沉积物组成是由火山物质和黄河沉积物两个物质端元混合而成,期间可能有少量台湾物质的加入,而长江沉积物的影响较小。前人的研究结果也同样佐证了这一观点:由于 7.3ka 以来,黑潮的主轴进入冲绳海

槽^[54],此时的海平面已处于高水位期,黑潮可以将台湾源的细粒陆源颗粒物向北搬运到冲绳海槽,受黑潮的影响,长江河流输入的陆源碎屑可能会被阻隔于内陆架^[3]。因此我们认为层位 1 主要受黄河沉积物控制,有部分长江物质加入;层位 2 垂向上受不同程度的火山物质影响^[29,45],是陆源和火山源物质同时沉积的结果。层位 1 与层位 2 截然不同的 REEs 特征反映了海槽中部沉积历史的演化,来源复杂多样,两个阶段沉积物源存在较大差异。

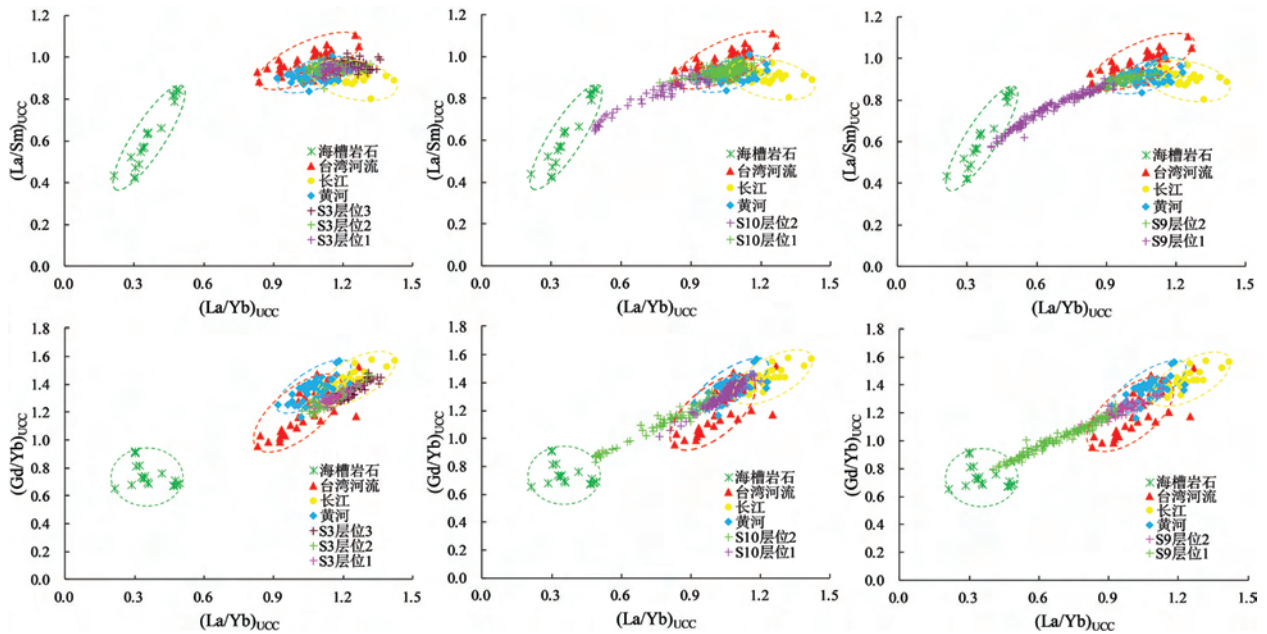


图 6 岩心沉积物(S3,S10^[29],S9^[30]),河流沉积物(长江^[22,31],黄河^[22,31],台湾河流^[32]),海槽岩石^[33] (La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}、(La/Yb)_{UCC}-(La/Sm)_{UCC} 差异图解

Fig.6 Discrimination plots of (La/Yb)_{UCC} vs. (Gd/Yb)_{UCC}, (La/Yb)_{UCC} vs. (La/Sm)_{UCC} for core sediments(S3,S10^[29],S9^[30]),

riverine sediments(Yangtze River^[22,31], Yellow River^[22,31], Taiwan rivers^[32]), and rocks^[33] in the Okinawa Trough

岩心 S9 与岩心 S10 类似,平均粒径由底部至顶部有逐渐降低的趋势(图 3c),也间接说明沉积环境在逐渐更替。不同层位间元素组成和稀土特征参数变化范围较大(图 2、图 4),说明 S9 在垂向上物源发生了转变,潜在物源对不同层位贡献程度存在差异。其球粒陨石标准化曲线同样表现出明显的上陆壳特征(图 5a),UCC 标准化图解与黄河沉积物相近,HREEs 富集程度具海槽岩石类似特征(图 5b),(La/Yb)_{UCC} 值较 S10 低(表 2),说明黄河携带的陆源物质可能是其重要物源,且火山物质贡献程度较 S10 大。其 (La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC} 和 (La/Yb)_{UCC}-(La/Sm)_{UCC} 散点图关联性较好,呈线性展布,线性关系较 S10 更为明显(图 6)。层位 1 与层

位 2 分布区域显著不同,其中层位 1 具有明显向火山物质端元靠近的趋势,部分样品甚至与火山物质具有几乎类似的 REEs 特征,另一端则靠近黄河沉积物端元,说明 S9 层位 1 主要由黄河沉积物和火山物质两个端元混合而成,混合比例在垂向上存在差异,期间火山物质对很多层位有不同程度的贡献。邻近的岩心 Y127、PC-1 同样报道了大量火山物质的存在^[12,27],说明海槽北部沉积物普遍受到了火山物质的影响^[45]。层位 2 散点图主要落在黄河沉积物上,说明黄河携带的陆源碎屑是层位 2 的主要物源,其他端元物质对层位 2 无明显贡献。台湾河流和长江两个物质端元对层位 2 贡献较小可能与 7.3ka 以来黑潮的加强,将长江沉积物阻隔在内陆

架外,黑潮强度由南至北减弱,输入冲绳海槽北部的台湾物质较少有关^[3,54]。结合以上分析可以看出S9从层位1到层位2物源变化显著,沉积环境在时间尺度上发生了变迁。

4 结论

(1)冲绳海槽南部S3、中部S10、北部S9岩心沉积物REEs组成存在显著差异。整体上看, Σ REE、 Σ LREE由南至北递减,北部具有最高的 Σ HREE,南部次之。LREEs与HREEs间的分馏程度,LREEs、HREEs内部分馏程度由南至北依次减小。这些差异是由于不同源区贡献程度的差异引起的。

(2)结合粒度、微量元素和稀土特征参数来看:岩心S3存在两个较小的浊流层,整体上物源较单一,沉积环境较稳定,主要受长江和台湾河流沉积物控制;岩心S10可分为两层,物源存在较大差异,层位1主要受黄河和长江沉积物控制,层位2具黄河沉积物和火山物质混合的特征,可能有少量其他源区物质加入;岩心S9从层位1到层位2物源变化显著,沉积环境在时间尺度上发生了变迁,层位1具黄河沉积物和火山物质混合特征,层位2则主要受黄河沉积物控制。

(3)冲绳海槽沉积物主要物源包括长江、黄河、台湾河流输入的陆源物质和日本列岛阶段性火山喷发产物。火山物质对海槽北部沉积物贡献程度最大,中部次之,南部几乎不受火山物质影响;台湾河流携带的陆源物质由南至北减小;长江输入的陆源物质对海槽南部贡献较大,中部次之,北部略小;黄河沉积物对海槽中部、北部贡献比例较大,而南部较小。

致谢:感谢2016年6月海底热液活动调查HOBAB4航次,“科学”号考察船全体队员对样品的获取所付出的辛勤劳动。

参考文献(References)

- [1] Sibuet J C, Letouzey J, Barbier F, et al. Back arc extension in the Okinawa Trough[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B13): 14041-14063.
- [2] Rodrigues A C, Grilo A, Riso N, et al. Okinawa trough back-arc basin: Early tectonic and magmatic evolution[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30245-30267.
- [3] Dou Y, Yang S, Liu Z, et al. Provenance discrimination of siliclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1-4): 212-220.
- [4] Dou Y, Yang S, Shi X, 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.
- [5] Liu J, Zhu R, Li T, et al. Sediment? magnetic signature of the mid-Holocene paleoenvironmental change in the central Okinawa Trough[J]. *Marine Geology*, 2007, 239(1-2): 19-31.
- [6] Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(1): 83-95.
- [7] Dou Y, Yang S, Liu Z, et al. Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: Implications for sediment provenance and paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 288(1-4): 108-117.
- [8] Xu Z, Li T, Chang F, et al. Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2014, 399(2): 236-245.
- [9] Wang J, Li A, Xu K, 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.
- [10] Xu Z, Li T, Clift P D, et al. Sediment provenance and paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough during the last 18.5 ky: Clay mineral and geochemical evidence[J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 139-149.
- [11] 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, et al. Elemental geochemical records of modern seafloor hydrothermal activities in sediments from the central Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanology Sinica*, 2007, 29(1): 58-65.]
- [12] Xu Z, Li T, Chang F, 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.
- [13] Haley B A, Klinkhammer G P, Mcmanus J. Rare earth elements in pore waters of marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(6): 1265-1279.
- [14] Och L M, Müller B, Wichser A, et al. Rare earth elements in the sediments of Lake Baikal[J]. *Chemical Geology*, 2014, 376(6): 61-75.
- [15] Klinkhammer G, Elderfield H, Hudson A. Rare earth elements in seawater near hydrothermal vents[J]. *Nature*, 1983, 305(5931): 185-188.
- [16] Hoyle J, Elderfield H, Gledhill A, et al. The behaviour of the rare earth elements during mixing of river and sea waters ☆[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(1): 143-

- 149.
- [17] Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4):971-991.
- [18] German C R, Masuzawa T, Greaves M J, et al. Dissolved rare earth elements in the Southern Ocean: Cerium oxidation and the influence of hydrography[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(8):1551-1558.
- [19] McLennan S M. Rare earth elements and sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21(8):169-200.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Yang S Y, Jung H S, Man S C, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2002, 201(2):407-419.
- [23] Yang S, Li C, 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.
- [24] 吴明清. 冲绳海槽沉积物稀土和微量元素的某些地球化学特征[J]. *海洋学报*, 1991, 13(1):75-81. [WU Mingqing. Geochemical characteristics of rare earth and trace elements in the sediment of Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(1):75-81.]
- [25] 刘娜, 孟宪伟. 冲绳海槽中段表层沉积物中稀土元素组成及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4):37-43. [LIU Na, MENG Xianwei. Characteristics of rare earth elements in surface sediments from the middle Okinawa Trough: implications for provenance of mixed sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4):37-43.]
- [26] 翟世奎, 陈志华, 徐善民, 等. 冲绳海槽北部稀土元素沉积地球化学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2):47-56. [ZHAI Shikui, CHEN Zhihua, XU Shanmin, et al. Geochemical characteristics of rare earth element in the sediments of north Okinawa Trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(2):47-56.]
- [27] 蒋富清, 孟庆勇, 徐兆凯, 等. 冲绳海槽北部 15kaBP 以来沉积物源及控制因素——稀土元素的证据[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(2):112-118. [JIANG Fuqing, MENG Qinyong, XU Zhaokai et al. The REE imprint on sediment provenance of the northern Okinawa Trough since the last 15 kaBP. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(2):112-118.]
- [28] 于增慧, 杜同军, 翟世奎. 冲绳海槽中部热液活动区岩心沉积物稀土元素地球化学特征[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(5):676-682. [YU Zenghui, DU Tongjun, ZHAI Shikui. Geochemical characteristics of the rare earth element compositions in the sediment core from the hydrothermal fields[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(5):676-682.]
- [29] 彭娜娜. 17000a 以来冲绳海槽中部柱状样 S10 沉积学特征及其物源环境指示[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016. [PENG Nana. The characteristics and provenances of core S10 sediments in the Central Okinawa Trough: Constraints on the index of paleoenvironment since 17000 a[D]. The University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2016.]
- [30] 姜韬. 冲绳海槽北部 S9 柱沉积地球化学特征及其环境指示[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015. [JIANG Tao. The sedimentary geochemical characteristics of the core S9 in the northern Okinawa Trough and their environmental significance during Holocene[D]. The University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2015.]
- [31] 蒋富清, 周晓静, 李安春, 等. $\delta\text{Eu}_N\text{-}\Sigma\text{REEs}$ 图解定量区分长江和黄河沉积物[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(11):1460-1468. [JIANG Fuqing, ZHOU Xiaojing, LI Anchuan, et al. Quantitatively distinguishing sediments from the Yangtze River and the Yellow River using $\delta\text{Eu}_N\text{-}\Sigma\text{REEs}$ plot[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008, 38(11):1460-1468.]
- [32] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69(12):39-47.
- [33] 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):117-137.
- [34] 袁迎如. 冲绳海槽的浊流沉积物[J]. *地质论评*, 1987, 33(6):499-505. [YUAN Yingru. Turbidites in the Okinawa Trough[J]. *Geological Review*, 1987, 33(6):499-505]
- [35] Boynton W V. Chapter 3-cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2(2):63-114.
- [36] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[J]. Blackwell Scientific Pub., 1985.
- [37] 赵德博, 万世明. 冲绳海槽沉积物物源示踪研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(2):32-41. [ZHAO Debo, WAN Shiming. Research progress of tracing sediment sources in Okinawa Trough[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(2):32-41.]
- [38] 秦蕴珊. 东海地质[M]. 科学出版社, 1987. [QIN Yunshan. *Geology of East China Sea*[M]. Science Press, 1987.]
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [44] River discharge to the coastal ocean: a global synthesis[M]. Cambridge University Press, 2013.
- [45] Machida H. The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 21(1): 71-94.
- [46] Tsunogai S, Suzuki T, Kurata T, et al. Seasonal and areal variation of continental aerosol in the surface air over the western North Pacific region[J]. *Journal of Oceanography*, 1985, 41(6): 427-434.
- [47] 陈建林, 马克俭. 冲绳海槽火山喷发矿物及其地质意义[J]. *海洋学研究*, 1983(2): 23-32. [CHEN Jianlin, MA Kejian. Volcanic eruption minerals and their geological significance [J]. *Oceanographic Research*, 1983(2):23-32.]
- [48] Vital H, Statterger K, Garbeschoenberg 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.
- [49] Bhatia M R, Crook K A. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contrib Mineral and Petrol*, 1986, 92(2): 181-193.
- [50] Condie K C. Another look at rare earth elements in shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.
- [51] Xu K, Milliman J D, Li A, et al. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [52] Bentahila Y, Othman D B, Luck J M. Strontium, lead and zinc isotopes in marine cores as tracers of sedimentary provenance: A case study around Taiwan orogen[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(1): 62-82.
- [53] Wei K Y. Leg 195 synthesis: site 1202-late quaternary sedimentation and paleoceanography in the southern Okinawa Trough[C]//*Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2006, 195(3): 1-31.
- [54] Jian Z, Wang P, 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.