

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020040202

马里亚纳“沟—盆”深水沉积环境稀土元素特征与物源约束

肖春晖^{1,2}, 王永红^{1,2}, 林间³, 田纪伟⁴

1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学地球科学学院, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

4. 物理海洋教育部重点实验室, 中国海洋大学, 青岛 266100

摘要:通过对西太平洋帕里西维拉海盆东南部的 C-P19 柱状样和马里亚纳海沟南坡的 L3 柱状样进行粒度和稀土元素地球化学分析,探讨了二者物源的异同。结果表明:研究区沉积物的稀土元素含量基本不受沉积物粒度控制,主要受控于物源变化。物源判别结果指示二者的物源具有同源性,其中西马里亚纳海脊剥蚀下来的火山物质对研究区的物质来源贡献最大。火山物质中的重矿物可以影响到稀土元素的含量,例如锆石的含量和稀土元素总量(ΣREE)的相关系数可达 0.86。来自中国内陆黄土的陆源风尘物质对两个研究区的物源供给也有一定贡献,但其贡献程度较小。由于马里亚纳海沟南坡更加远离大陆且纬度更低,其接受的亚洲风尘也比帕里西维拉海盆和挑战者深渊更少。此外,南极底层水流经研究区,对海盆和海沟的沉积物都造成一定影响,而且在马里亚纳海沟南坡更加活跃,因而帕里西维拉海盆东南部的沉积物比马里亚纳海沟南坡更易于保存。

关键词:物源;稀土元素;帕里西维拉海盆;马里亚纳海沟;南极底层水

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

Characteristics of rare earth elements in deep-water sediments in Mariana “Trench-Basin” system and their provenance constraints

XIAO Chunhui^{1,2}, WANG Yonghong^{1,2}, LIN Jian³, TIAN Jiwei⁴

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory of Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

4. Physical Oceanography Lab, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Based on the grain size and rare earth elements (REE) geochemical data of the core C-P19 from the southeastern Parece Vela Basin and the core L3 from the south slope of the Mariana Trench in the western Pacific Ocean, we summarized and discussed in this paper both the similarities and differences in provenances between the sediments in the two places. Our study suggests that no obvious correlation between REE content and grain size of the sediments is observed in the study area, and the composition and distribution patterns of the rare earth elements are mainly constrained by provenance. The provenance discrimination results reveal that the sediments in the Parece Vela Basin and on the south slope of the Mariana Trench are homologous, and contributed mainly by the volcanic materials eroded from the western Mariana Ridge. Heavy minerals in volcanic materials may affect the content of rare earth elements. For example, the correlation coefficient between the

资助项目:国家重点研发计划项目“基于长序列及多要素原型观测的水沙异变研究”(2016YFC0402602);国家自然科学基金“基于模糊聚类方法的黄渤海表层沉积物物源和输移路径的磁性诊断”(41376054),“中国东部陆架海泥质区菌生磁铁矿的形成及环境控制因素研究”(41176039),“第四届中澳海洋科学技术研讨会”(41410304022),“南海海盆的深部结构和扩张过程的集成研究”(91628301),“海洋地质过程与环境”(U1606401);国家海洋局公益性项目“海岛旅游海滩管理技术研究与应用示范”(201405037);“全球变化与海气相互作用”专项“西太平洋中南部水体综合调查冬季航次”(GASI-02-PAC-ST-MSwin);中国科学院前沿科学重点研究项目北印度洋“莫克兰研究计划”“俯冲带岩浆与流体活动的立体探测研究”(QYZDY-SSW-DQC005);中国科学院项目“马里亚纳海沟动力学机制及极端环境研究”(Y4SL021001)

作者简介:肖春晖(1991—),女,博士,从事海洋沉积学研究, E-mail: chunhuixiao@qq.com

通讯作者:王永红(1969—),女,博士,教授,从事海洋沉积学研究, E-mail: yonghongw@ouc.edu.cn

收稿日期:2020-04-02; **改回日期:**2020-05-08. 蔡秋蓉编辑

content of zircon and the ΣREY is as high as 0.86. The terrigenous eolian dusts of loess from Chinese inland also contribute some to the sediment of the study area, but is not substantially. Since the south slope of the Mariana Trench is far away from the mainland and located in lower latitude, it receives little Asian dust comparing to the Parece Vela Basin and Challenger Deep. In addition, the Antarctic Bottom Water passing through the study area has certain impact on the sediments of the basin and trench, and is more active in the south slope of Mariana Trench. Therefore, the sediment deposited in the southeastern Parece Vela Basin is relatively easier to be preserved than that on the south slope of Mariana Trench.

Key words: sediment provenance; rare earth elements; the Parece Vela Basin; the Mariana Trench; Antarctic Bottom Water

西太平洋边缘海发育着地球上最年轻、最复杂的沟-弧-盆体系^[1-4], 其独具特色的构造^[5-7]、地形^[8-13]和沉积作用^[14-17]日益受到各界学者的关注。由于复杂地形的影响, 西太平洋中一些远离陆地、夹在两大俯冲带之间且四周被深海沟包围的海盆会因岛弧和海脊的限制, 形成陆源碎屑物质匮乏的近封闭海盆环境, 例如西太平洋的帕里西维拉海盆。它地理位置特殊, 东临西马里亚纳海脊, 南部是复杂的沟弧和断裂带系统, 西连帕劳海脊, 北接四国海盆, 与四国海盆连接处的索夫干断裂又阻挡了大部分从北而来的沉积物输送^[18]。因而研究和对比帕里西维拉海盆与马里亚纳海沟的物质来源有助于我们认识西太平洋复杂地形控制下的深水沉积过程。

稀土元素 (La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y) 由于其在运移过程中性质稳定, 且蕴藏了源区的母岩类型、气候变化特征、沉积环境、搬运过程等多种信息, 也被学者们誉为地球化学示踪剂、探途元素和指纹等, 在追溯海洋沉积物物源时被广泛应用^[17, 19-28]。

目前虽然在国际上中国对帕里西维拉海盆以及马里亚纳海沟的研究已经在物源、古气候、古海洋及构造等方面取得了优势性进展^[7, 10, 13, 17, 19-20, 22, 27-40], 但前人成果多集中在帕里西维拉海盆西部, 海盆东部的研究还存在大片空白。本文基于沉积物稀土元素地球化学分析方法, 选取帕里西维拉海盆东南部的 C-P19 柱状样和马里亚纳海沟南坡的 L3 柱状样进行综合分析, 探讨其物质来源并对比其差异性, 该研究是对比西太平洋边缘海“沟-盆”深水沉积环境物质来源的一次新尝试, 对今后研究深水沉积过程及物质输移路径都具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本文研究的 C-P19 重力柱状样 (12.81°N、140.83°E) 由“实验 3”考察船于 2016 年马里亚纳海沟综合科

考航次取得, 水深 4 171 m, 位于西太平洋帕里西维拉海盆东南部 (图 1), 柱长共 378 cm。L3 重力柱状样 (10.35°N、142.29°E) 位于马里亚纳海沟南坡, 水深 4 500 m, 柱长共 225 cm。

1.2 分析方法

1.2.1 粒度分析

本文对帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样的 184 个样品和马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样的表层 (0 cm)、上层 (45~50 cm)、中层 (102~106 cm) 以及下层 (163~167 cm) 4 个样品进行了粒度分析。为了尽可能提取陆源信息, 避免钙质、硅质生物的干扰, 样品上机测试前需要进行预处理, 具体方法如下: 取约 0.3 g 样品放入 15 mL 离心管中, 依次加入超纯水、H₂O₂ 溶液 (15%)、冰乙酸溶液 (20%) 和 2.0 mol/L 的 Na₂CO₃ 溶液, 分别去除沉积物中的海盐、有机质、碳酸盐和生物硅组分。最后, 上机测试前加入 5 mL 六偏磷酸钠 (0.05 mol/L) 分散样品, 防止发生絮凝。

粒度分析使用英国 Mastersizer-2000 型激光粒度仪, 在海底科学与探测技术教育部重点实验室完成, 粒径间距为 1/4 Φ , 重复测量的相对误差在 2% 以内。本文平均粒径 (M_z) 采用 McManus 矩法计算。

1.2.2 碎屑组分重矿物分析

本文对帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样上段 (118 cm)、中段 (170 cm) 和下段 (334 cm) 3 个样品以及马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样表层 (0 cm)、上层 (45~50 cm)、中层 (102~106 cm) 和下层 (163~167 cm) 4 个样品进行了重矿物分析, 该实验在海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。

取原样 3~4 g, 加 15% 的过氧化氢溶液去除有机质, 充分反应后筛取 0.063~0.125 mm 粒级的碎屑矿物烘干, 用三溴甲烷重液 (相对密度: 2.89 g/cm³) 进行轻、重矿物组分分离。然后采用体视显微镜和偏光显微镜油浸法, 对重矿物进行系统鉴定, 样品量小于 0.4 g 时, 对全部颗粒进行观察鉴定, 超过 0.4 g 的样品则用四分法或条带分段法缩分, 计数 300~

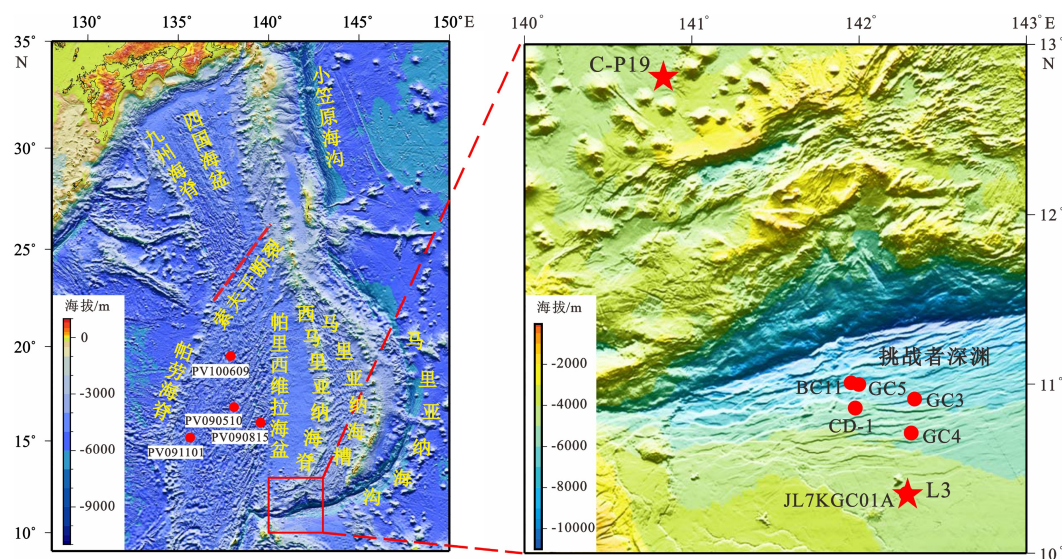


图1 研究区样品位置图

红色圆点引自前人文献中的站位, 其中柱状样 PV100609, PV090510, PV090815, PV091101 来自文献 [40], 柱状样 JL7KGC01A 来自文献 [22], 箱式柱状样 BC11 和柱状样 GC5, GC4, GC3 来自文献 [39], 柱状样 CD-1 来自文献 [28]; 红色五角星为本网站位。

Fig.1 Location map of the study area

Red dots are other cores cited from previous references, cores PV100609, PV090510, PV090815 and PV091101 from reference [40]; core JL7KGC01A from reference [22]; box core BC11 and cores GC5, GC4, GC3 from reference [39]; core CD-1 from reference [28]; red stars are cores in this paper.

500 颗以求得各种矿物的颗粒百分含量。

1.2.3 稀土元素分析

C-P19 柱状样顶部 (4~62 cm) 和底部 (324~374 cm) 按 10 cm 的间隔取样, 中间部分 (62~324 cm) 按 20 cm 的间隔取样, 共 25 个样品进行了元素分析。L3 柱状样中对表层 (0 cm)、上段 (45~50 cm)、中段 (102~106 cm) 和下段 (163~167 cm) 共 4 个样品进行了稀土元素分析。样品烘干后用玛瑙研钵研成 200 目的粉末, 再次烘干冷却后准确称取 40.00 mg (39~41) 置于聚四氟乙烯材质的溶样内胆中, 加入经亚沸蒸馏的高纯 HNO_3 和 HF (各 1.50 mL) 并摇匀。将聚四氟乙烯内胆拧紧瓶盖后放入不锈钢消解罐中, 旋紧外盖后放入烘箱, 180 °C 高温加热 48 h 以上, 冷却后取出内胆, 于开口状态下置于电热板上加热, 蒸至内胆中的溶液呈湿盐状, 随后再加入 1 mL 经亚沸蒸馏的 HNO_3 蒸干 (排出残余的 HF), 然后加入 3 mL 经亚沸蒸馏的高纯 HNO_3 和 HF 混合溶液 (按照 1:1 比例, 即 HNO_3 和 HF 各 1.50 mL), 再放入烘箱 150 °C 加热 24 h 以上, 以确保对样品的完全提取。冷却后, 将最终的提取液转移至干净的聚酯瓶中, 再用 2% 的稀 HNO_3 定容至 80 g, 待测。

以国家有色金属及电子材料分析测试中心多元素标准溶液 (GNM-M16181、GNM-M33198) 制备曲线用标准溶液, 来绘制标准工作曲线, 同时以

GBW07308a、GBW07315、GBW07316 为监控样品, 使用 Varian820 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 美国瓦里安公司制造) 测定了稀土元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) 和微量元素 Zr。所测定元素的相对标准偏差 (RSD) 均小于 5%, 符合要求。

稀土元素含量使用北美页岩进行标准化^[41], Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 的计算参照^[42]: $\delta\text{Ce}=\text{Ce}/\text{Ce}^*=\text{Ce}_\text{N}/(1/2\text{La}_\text{N}+1/2\text{Pr}_\text{N})$, $\delta\text{Eu}=\text{Eu}/\text{Eu}^*=\text{Eu}_\text{N}/(1/2\text{Sm}_\text{N}+1/2\text{Gd}_\text{N})$ 。

1.2.4 物源判别分析

为了判别各可能物源对该区沉积物物质来源的贡献及影响程度, 我们利用物源判别函数进行判断。具体公式如下:

$$\text{DF}=(\text{C}_{1\text{x}}/\text{C}_{2\text{x}})/(\text{C}_{1\text{L}}/\text{C}_{2\text{L}})-1 \quad (1)$$

式中, $(\text{C}_{1\text{x}}/\text{C}_{2\text{x}})$ 表示研究区样品中两种元素的比值, $(\text{C}_{1\text{L}}/\text{C}_{2\text{L}})$ 表示可能的潜在物源中两种元素的比值。当 $|\text{DF}|<0.5$ 时, 指示二者的物源相近, 且 $|\text{DF}|$ 值越小, 二者的沉积物来源越相近, 该方法已广泛应用于海洋沉积物的物源判别^[17, 19-20, 22, 28, 43]。

由于稀土元素性质稳定, 且各元素间的化学性质非常相近, 为了提高 DF 公式判别的准确性, 我们决定选用稀土元素对 Lu/Yb 和 Sm/Nd 来分别计算当地的火山物质来源和经风尘输入的陆源黄土来源。

2 实验结果

2.1 岩性特征

帕里西维拉海盆的 C-P19 柱状样沉积物为黄褐色深海软泥,其颜色在浅黄色—棕色—棕褐色间交替变化,4~22 cm,沉积物含水量高,颜色较浅,呈浅黄色,偶见有孔虫;22~50 cm,样品呈棕色,52~60 cm,样品颜色再次变浅,呈浅黄色;随后颜色加深,含水量减少,沉积物压实致密,颜色以棕色—棕褐色为主,在 104 和 226 cm 处又可见几厘米的浅黄色沉积层。

马里亚纳海沟南坡的 L3 柱状样沉积物为褐黄色深海软泥,表层含少量砾石(主要为岩屑和结核),底部致密,各层段样品颜色一致,未见明显变化。

2.2 粒度特征

根据 Shepard 沉积物分类方案,帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物多为粉砂和砂质粉砂,含少量黏土质粉砂,偶见粉砂质砂。平均粒径的变化范围较大,为 5.32~86.76 μm,平均值为 19.97 μm;分选系数为 1.11~2.89,平均值为 1.62,分选较差;偏态为-0.46~0.14,平均值为-0.29,为负偏;峰态为 0.74~1.39,平均为 1.11,峰态呈中等—窄(表 1)。

马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样沉积物多为粉砂,仅表层样品为砂质粉砂,平均粒径变化范围较小,为 12.11~14.68 μm,平均值为 13.38 μm,沉积物粒度明显比 C-P19 小得多;分选系数为 1.49~2.40,平均值为 1.72,分选差;偏态的波动范围较大,为-1.34~1.01,平均值为-0.05,近于对称;峰态变化范围为 1.99~3.00,平均为 2.26,峰态很窄(表 1)。

2.3 重矿物组合及其变化特征

2.3.1 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样

帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物中 63~125 μm 的碎屑矿物含量低,其变化范围为 0.26%~0.86%,平均为 0.63%,其中重矿物含量在碎屑矿物中占 0.55%~1.89%,平均为 1.11%。重矿物种类较单一,已鉴定的有 10 种,其中主要矿物有磁铁矿、钛铁矿、锆石、斜方辉石、绿帘石、普通角闪石,质量分数较低或仅在个别层位出现的矿物有赤、褐铁矿和白云母,此外还可见大量岩屑。岩屑以基性为主,颜色较深,呈黑色、红褐色等,结构致密。在不同段位,重矿物类型差别不大,但各矿物所占比例具有明显差异(表 2)。

2.3.2 马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样

马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样沉积物中 63~125 μm 的碎屑矿物含量低,其变化范围为 0.28%~2.15%,平均为 0.79%,但重矿物含量在碎屑矿物中所占比例较高,为 4.53%~22.86%,平均为 14.16%。重矿物类型比帕里西维拉海盆复杂,主要有岩屑、单斜辉石、斜方辉石、赤/褐铁矿、普通角闪石、磁铁矿、钛铁矿、绿帘石、锆石等,质量分数较低或仅在个别层位出现的矿物有白云母、电气石、金红石、磷灰石、重晶石、自生黄铁矿、透闪石、石榴石、榍石等(表 2),偶见火山玻璃,在偏光镜下呈浅色、气孔状、珍珠状及其他不规则形状,正极低突起的非晶质矿物。

2.4 稀土元素的垂向分布特征

2.4.1 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样

帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物的稀土元素测试结果见表 3。样品整体稀土元素总量(ΣREY,

表 1 L3 和 C-P19 柱状样的粒度参数
Table 1 Grain size parameters of the cores L3 and C-P19

样品	深度	平均粒径/μm	分选系数	偏度	峰态	砂/%	粉砂/%	黏土/%
L3柱状样	表层(0 cm)	14.68	2.40	-1.34	3.00	22.23	55.88	21.89
	上层(45~50 cm)	12.11	1.49	1.01	2.01	5.21	82.68	12.11
	中层(102~106 cm)	14.19	1.49	0.69	1.99	8.62	82.27	9.12
	下层(163~167 cm)	12.53	1.50	-0.54	2.03	6.78	82.20	11.01
	平均值	13.38	1.72	-0.05	2.26	10.71	75.76	13.53
C-P19柱状样	最小值	5.32	1.11	-0.46	0.74	0	40.66	4.95
	最大值	86.76	2.89	0.14	1.39	53.05	87.88	37.34
	平均值	19.97	1.62	-0.29	1.11	14.88	73.06	12.06

表 2 C-P19 和 L3 柱状样沉积物中主要重矿物类型及所占比例 (%)
Table 2 Types of heavy minerals and their proportions in the sediments of core L3 and C-P19 (%)

矿物类型	C-P19柱状样				L3柱状样		
	上	中	下	表	上	中	下
磁铁矿	20	44.33	16.67		4.02	3.44	4.46
钛铁矿	3.64	11.34	8.89	2.89	2.87	2.19	17.83
赤、褐铁矿		4.12		5.20	19.54	17.81	21.66
锆石	20	2.06	4.44	0.87	0.57	1.25	0.96
榍石							0.32
磷灰石						0.31	
金红石				0.58			0.96
电气石	1.82	1.03		1.45	1.15		
石榴石				0.58	0.57		
斜方辉石	10.91	3.09	27.78	4.05	8.05	4.69	0.96
单斜辉石				16.18	26.72	12.19	2.23
普通角闪石	9.09	6.19	6.67	5.20	4.60	1.25	1.59
阳起透闪石				1.45	0.57		0.32
绿帘石	9.09	14.43	14.44	5.49	6.32	4.06	1.59
(斜)黝帘石					0.29		
黑云母			1.11				
白云母	1.82	2.06		0.58		1.25	
自生黄铁矿						2.19	0.32
碳酸盐				3.76	2.87		0.96
水云母						1.25	
岩屑	23.64	11.34	20	51.73	21.84	47.81	45.86
重晶石						0.31	

$\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)的变化范围为 147.15~342.29 $\mu\text{g/g}$, 平均为 282.25 $\mu\text{g/g}$, 样品表现为明显的 δCe 负异常和轻微 δEu 正异常, 其中 δCe 为 0.58~0.72, 平均值为 0.64, δEu 值为 1.10~1.18, 平均值为 1.13。

轻稀土元素(La-Eu)总量(ΣLREE)与重稀土元素(Gd-Lu)总量(ΣHREE)比值变化范围为 5.82~7.63, 平均为 6.56, 表明轻重稀土元素间发生了明显的分异, 轻稀土与重稀土相比更加富集, 且随深度增加呈现缓慢递增趋势。分别用稀土元素对 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 代表轻稀土(La-Nd)、中稀土(Sm-Dy)和重稀土(Ho-Lu+Y)之间的比值关系, C-P19 柱状样沉积物的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值分别为 0.76、0.85 和 1.13, 显示轻、中、重稀土元素内部也发生了轻微的

分异作用, 且轻稀土和中稀土元素的富集程度在垂向上变化趋势相近(表 3)。

2.4.2 马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样

马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样表、上、中、下段沉积物的稀土元素测试结果见表 3。柱状样中表层(0 cm)稀土含量总量最高, ΣREY 为 451.61 $\mu\text{g/g}$, 明显高于帕里西维拉海盆的 C-P19 柱状样。样品表现为明显的 δCe 负异常和轻微 δEu 正异常, 其中 δCe 平均为 0.49, δEu 平均为 1.13。

马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样轻稀土元素(La-Eu)总量(ΣLREE)与重稀土元素(Gd-Lu)总量(ΣHREE)比值 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的变化范围为 4.92~6.27, 平均值为 5.66, 表明轻重稀土元素间发生了明显的分异, 轻稀土与重稀土相比更加富集,

表 3 C-P19 和 L3 柱状样沉积物稀土元素含量 (μg/g) 及特征参数
Table 3 REE contents (μg/g) and characteristic parameters of the core C-P19 and L3

深度/cm	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREY	ΣLREE/ ΣHREE	δEu	δCe	(La/sm) _N	(La/Yb) _N	(Sm/Yb) _N
4	22.86	32.84	5.90	25.04	5.69	1.47	5.59	0.94	6.13	1.18	3.02	0.47	2.72	0.43	32.87	147.15	6.21	1.14	0.62	0.72	0.81	1.14
12	25.61	37.75	6.57	27.88	6.28	1.60	6.24	1.04	6.94	1.29	3.38	0.53	3.00	0.49	37.38	165.98	6.27	1.13	0.63	0.73	0.83	1.14
22	28.76	41.18	7.43	31.45	7.02	1.84	7.22	1.19	7.94	1.49	3.81	0.59	3.46	0.54	40.87	184.79	6.10	1.14	0.61	0.73	0.81	1.10
32	44.03	64.69	11.61	49.07	11.33	2.91	11.23	1.86	12.38	2.31	6.07	0.94	5.43	0.85	61.28	285.99	6.05	1.13	0.62	0.69	0.79	1.14
42	45.33	64.25	11.99	50.24	11.78	3.04	11.58	1.93	12.67	2.33	6.14	0.96	5.57	0.85	63.8	292.46	6.02	1.14	0.60	0.69	0.79	1.15
52	33.86	50.91	8.75	36.47	8.20	2.08	8.02	1.34	8.72	1.61	4.22	0.64	3.77	0.58	43.38	212.55	6.65	1.12	0.64	0.74	0.87	1.18
62	35.12	53.33	9.09	37.96	8.51	2.19	8.34	1.38	9.07	1.67	4.35	0.68	3.93	0.60	45.98	222.20	6.68	1.14	0.65	0.74	0.87	1.18
82	50.68	69.61	13.04	55.60	12.81	3.31	12.91	2.11	14.12	2.64	6.89	1.05	6.27	0.98	70.08	322.10	5.91	1.13	0.59	0.70	0.78	1.11
104	44.79	63.97	11.63	48.57	11.10	2.82	11.01	1.83	12.08	2.22	5.76	0.89	5.23	0.80	59	281.70	6.26	1.12	0.61	0.72	0.83	1.15
124	52.67	72.03	13.55	57.26	13.06	3.29	13.18	2.22	14.62	2.77	7.31	1.12	6.62	1.02	72.87	333.59	5.84	1.10	0.59	0.72	0.77	1.07
144	49.86	71.61	12.34	51.72	11.90	3.00	11.89	1.95	13.19	2.44	6.55	1.02	5.96	0.93	67.96	312.32	6.16	1.11	0.63	0.75	0.81	1.09
164	55.18	73.29	13.51	57.72	13.03	3.30	13.27	2.18	14.76	2.74	7.31	1.11	6.70	1.02	75.27	340.39	5.93	1.10	0.58	0.75	0.80	1.06
184	54.92	74.60	13.37	56.69	12.88	3.27	12.97	2.15	14.80	2.81	7.55	1.16	6.92	1.06	77.14	342.29	5.82	1.11	0.60	0.76	0.77	1.01
206	52.24	74.37	13.03	54.29	12.32	3.16	12.29	2.05	13.39	2.58	6.83	1.06	6.32	0.96	68.52	323.41	6.23	1.13	0.62	0.76	0.80	1.06
226	37.47	53.26	9.23	38.45	8.65	2.14	8.47	1.37	9.13	1.66	4.47	0.68	4.07	0.60	45.82	225.47	6.72	1.10	0.62	0.77	0.89	1.16
244	51.09	76.51	12.51	52.41	11.88	3.07	11.66	1.93	12.72	2.34	6.34	0.98	5.79	0.87	62.42	312.52	6.63	1.14	0.66	0.77	0.85	1.12
264	52.80	79.24	13.12	54.65	12.51	3.12	12.34	2.04	13.37	2.41	6.45	1.00	5.97	0.91	65.95	325.88	6.64	1.10	0.66	0.75	0.86	1.14
284	51.23	77.78	12.63	52.28	11.85	3.04	11.54	1.92	12.78	2.36	6.38	0.99	5.96	0.90	63.5	315.14	6.60	1.14	0.67	0.77	0.83	1.08
304	49.64	79.23	12.23	50.96	11.43	2.83	11.01	1.81	11.91	2.17	5.65	0.90	5.33	0.81	58.46	304.37	7.17	1.11	0.70	0.77	0.90	1.16
324	51.59	84.12	12.47	51.20	11.22	2.85	10.77	1.76	11.49	2.11	5.67	0.87	5.21	0.78	57.32	309.43	7.63	1.14	0.72	0.82	0.96	1.17
334	51.26	79.98	12.37	50.30	11.07	2.80	10.44	1.71	11.34	2.04	5.49	0.83	5.04	0.76	56.95	302.38	7.61	1.14	0.69	0.83	0.99	1.19
344	51.74	77.81	12.27	50.40	11.00	2.90	10.61	1.72	11.49	2.10	5.66	0.86	5.18	0.79	59.11	303.64	7.37	1.18	0.67	0.84	0.97	1.15
354	51.28	77.86	12.29	50.87	11.15	2.91	10.71	1.75	11.58	2.14	5.57	0.87	5.30	0.79	57.03	302.10	7.32	1.17	0.68	0.82	0.94	1.14
364	49.19	72.76	11.90	49.18	10.83	2.82	10.47	1.72	11.37	2.02	5.46	0.84	5.08	0.76	59.72	294.12	7.17	1.16	0.66	0.81	0.94	1.16
374	48.58	73.91	11.82	49.77	10.95	2.84	10.70	1.75	11.53	2.18	5.73	0.90	5.40	0.81	57.45	294.32	6.93	1.15	0.67	0.79	0.87	1.10
0	69.1	62.9	19.0	82.9	19.7	5.00	20.6	3.38	18.9	4.27	11.1	1.66	10.1	1.55	121.56	451.61	4.92	1.09	0.38	0.63	0.66	1.06
50	49.2	61.1	13.3	56.3	13.2	3.54	13.6	2.22	12.4	2.71	7.05	1.05	6.41	0.99	74.58	317.52	5.88	1.16	0.52	0.67	0.74	1.12
106	44.1	51.4	11.9	51.6	12.2	3.15	12.6	2.06	11.4	2.53	6.72	1.01	6.07	0.94	68.17	285.85	5.55	1.12	0.49	0.65	0.70	1.09
167	41.7	55.5	11.0	47.1	11.1	2.87	11.2	1.83	9.99	2.19	5.77	0.873	5.14	0.80	59.51	266.67	6.27	1.13	0.56	0.67	0.79	1.17

且轻重稀土元素的分异程度随深度增加而增加(表3)。(La/Yb)_N、(La/Sm)_N和(Sm/Yb)_N比值结果显示,L3柱状样沉积物的轻、中、重稀土元素内部也发生了较明显的分异作用,且中稀土和重稀土富集程度相似。

2.5 稀土元素的配分模式

帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样和马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样沉积物的稀土元素经过北美页岩标准化后均显示出一致的配分模式,指示其沉积物来源具有一定相似性。由图2可知,二者轻、重稀土均呈较富集状态,C-P19柱状样上段(4~104 cm)的稀土元素总量较中段(124~304 cm)和下段(324~374 cm)略低,而L3柱状样则恰好相反,其表层的稀土元素总量明显较其他层位高,该差异可能是由这段沉积时期二者物源供给情况不同导致的。此外,C-P19柱状样和L3柱状样的稀土元素配分曲线中均表现出明显的Ce负异常,和轻微的Eu正异常

常,且L3柱状样沉积物的Ce负异常程度明显比C-P19大。

3 讨论

3.1 粒度对稀土元素含量的影响

研究结果显示,影响海洋沉积物中的稀土含量分布最主要的因素是物源^[44-47],此外,沉积物粒度也会造成REE含量与分布的差异^[48-50]。因此,在用REE示踪沉积物物源时,应对其制约因素进行讨论。粒度是影响沉积物REE组成的重要因素,且前人研究表明REE存在明显向细粒沉积物中富集的趋势^[49-50]。C-P19柱状样沉积物中 Σ REY与黏土含量和平均粒径均无明显相关性,相关系数分别为0.37和0.13(图3),说明研究区稀土元素富集与沉积物粒度的关系较弱。

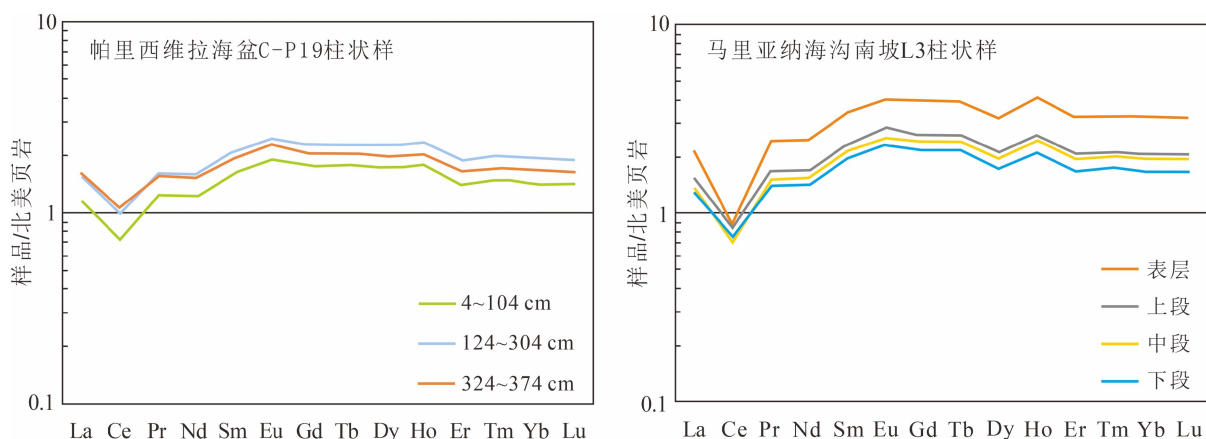


图2 帕里西维拉海盆和马里亚纳海沟南坡柱状样沉积物稀土元素北美页岩标准化配分曲线图

Fig.2 NASC-normalized REE patterns of core samples in the Parece Vela Basin and south slope of the Mariana Trench

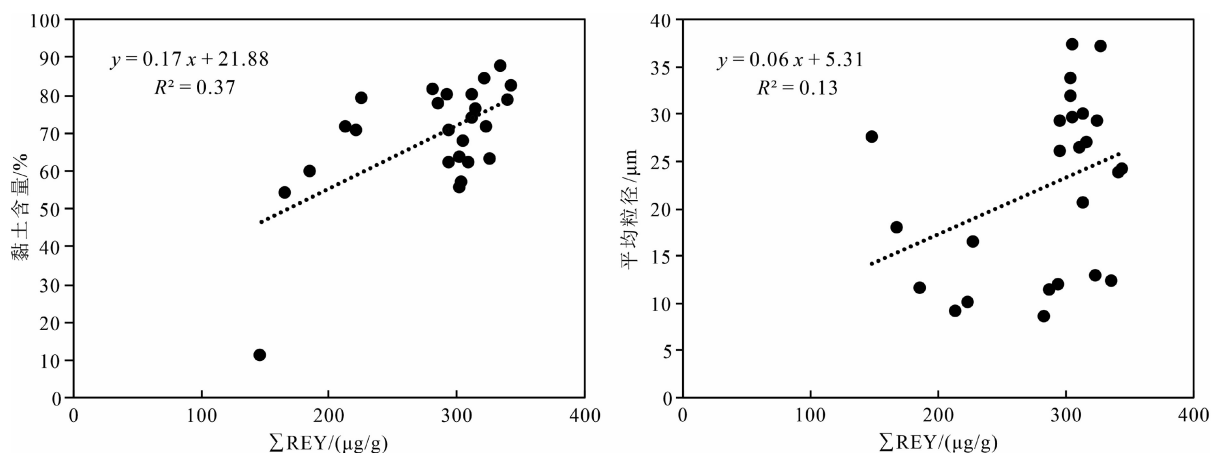


图3 C-P19柱状样沉积物 Σ REY含量与粒度相关图

Fig.3 Correlation diagram of Σ REY content and grain size of the C-P19 core sediments

3.2 物源分析

3.2.1 重矿物对物源的指示

在不考虑岩屑的情况下, 根据矿物的稳定性可将重矿物分为 4 类, 研究结果表明: 马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样沉积物以稳定矿物(平均 45.74%)和不稳定矿物(平均 39.04%)为主, 相对稳定矿物(平均 10.18%)含量次之, 极稳定矿物(平均 5.38%)含量最低; 而帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物以稳定矿物(平均 43.44%)为主, 不稳定矿物(平均 26.57%)含量次之, 相对稳定矿物(平均 15.41%)和极稳定矿物(平均 11.36%)含量最低(图 4)。

在帕里西维拉海盆和马里亚纳海沟南坡, 表征矿物成熟度的 $ZTR/HP=(\text{锆石}+\text{电气石}+\text{金红石})/(\text{角闪石}+\text{辉石})$ 分别为 0.43 和 0.15, 说明帕里西维拉海盆沉积物中的矿物成熟度比马里亚纳海沟南坡高, 由此可以推断马里亚纳海沟南坡沉积物应以近源沉积的火山物质为主, 而帕里西维拉海盆沉积物中除了沉积来自周边的火山碎屑等不稳定矿物之外, 还可能有部分经由远距离搬运而来的以稳定矿物为主的沉积物来源。

重矿物的含量也可以对稀土元素有重要贡献^[50], 并且一些特征重矿物(如磷灰石、锆石、榍石、独居石等)可能会影响沉积物的 REE 分异特征与配分曲线形态。重矿物分析结果显示, C-P19 柱状样沉积物中未见磷灰石、榍石和独居石等重矿物类型, 但锆石在各层位中均有分布, 其 ΣREY 与 Zr 元素的相关系数为 0.86, 表明帕里西维拉海盆沉积物中的稀土元素含量与锆石含量呈正相关。L3 柱状样沉积物中锆石、榍石和磷灰石的总和在表、上、中、下层位中的含量均小于 2%, 故不考虑特征重矿物对马里亚纳海沟南坡沉积物中稀土元素富集的影响。

3.2.2 稀土元素对物源的指示

前人研究表明, 帕里西维拉海盆和马里亚纳海

沟受东亚季风气影响明显, 其沉积物物源除了来自附近岛弧、海脊的火山物质外, 还有小部分陆源风尘的输入^[17, 34-35, 37-38, 51]。为了进一步确定研究区沉积物中火山物质和大陆风尘对物源的贡献, 我们计算了各潜在可能物源的 DF 值, 结果见表 4。

由表 4 可知, 九州-帕劳海脊、马里亚纳海槽玄武岩、西马里亚纳海脊凝灰岩以及帕里西维拉海盆凝灰岩火山物质的 DF 值都远小于 0.5, 表明当地及附近火山物质是帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样和马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样的主要物质来源。此外, 我们还将结果与马里亚纳海沟南坡附近的其他柱状样(JL7KGC01A, CD-1, GC3, GC4, GC5 和 BC11)和马里亚纳海沟挑战者深渊上方水体中的下沉颗粒进行了对比, 研究结果表明, 马里亚纳“沟-盆”沉积体系中, 沉积物来源具有同源性, 且来自西马里亚纳海脊的火山物质对该区沉积物来源的贡献最大。

研究区 C-P19 柱状样和 L3 柱状样的陆源中国黄土的 DF 值虽然也小于 0.5, 但是与火山源 DF 结果相比, 明显偏高, 说明来自中国黄土的陆源风尘物质对研究区的沉积物来源存在一定贡献, 但其贡献程度与火山物质相比要小得多。此外, 可能由于马里亚纳海沟南坡距离亚洲大陆更远且纬度更低, 受东亚季风气影响较帕里西维拉海盆和挑战者深渊更小, L3 柱状样的黄土 DF 值也明显高于帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样和挑战者深渊上方水体中下沉颗粒的黄土 DF 值, 表明亚洲风尘对马里亚纳海沟南坡沉积物的贡献更小, 而相应地火山物质在物源贡献中的占比将更大。

3.2.3 二者物源及沉积环境的差异性分析

虽然帕里西维拉海盆与马里亚纳海沟在物源组成上具有同源性, 但二者物源供给量仍表现出显著差异。帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样的底界年龄小于 1.072 Ma, 沉积速率在大约 1~0.78 Ma 期间为 400 cm/Ma, 0.78 Ma 至今为 360 cm/Ma^[55]; 马里亚纳

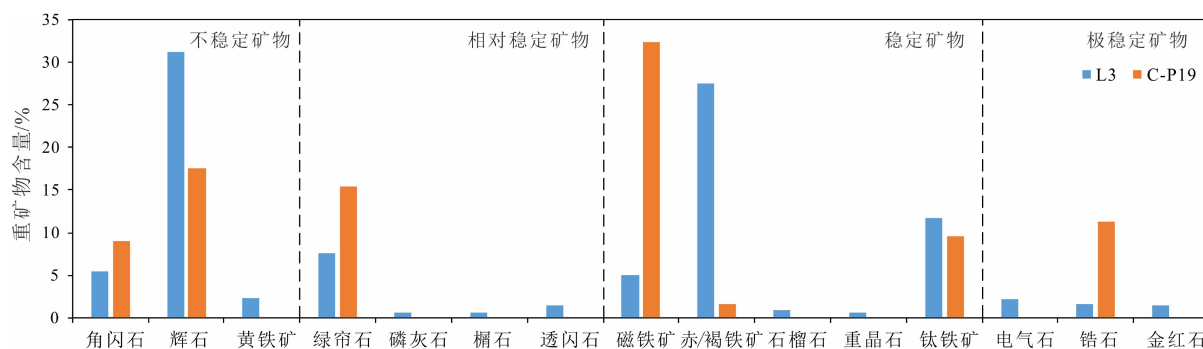


图 4 马里亚纳海沟南坡和帕里西维拉海盆沉积物重矿物含量对比

Fig.4 Comparison of heavy mineral contents in the sediments of the south slope of Mariana Trench and the Parece Vela Basin

表 4 帕里西维拉海盆和马里亚纳海沟物源判别函数值 (DF)
Table 4 DF value of provenance discrimination function in the Parece Vela Basin and the Mariana Trench

样品类型	火山源				陆源
	九州-帕劳海脊 凝灰岩	马里亚纳海槽 玄武岩	西马里亚纳海脊 凝灰岩	帕里西维拉海盆 凝灰岩	中国黄土
C-P19柱状样	0.09	0.11	0.03	0.12	0.37
L3柱状样	0.08	0.12	0.02	0.14	0.44
JL7KGC01A柱状样	0.10	0.09	0.04	0.11	0.38
CD-1柱状样	0.10	0.10	0.04	0.11	0.43
GC3柱状样	0.04	0.19	0.05	0.21	0.39
GC4柱状样	0.04	0.18	0.04	0.19	0.38
GC5柱状样	0.03	0.19	0.05	0.20	0.39
BC11柱状样	0.07	0.15	0.04	0.17	0.39
马里亚纳海沟挑战者深渊上方 水体中的沉降颗粒物	0.09	0.12	0.05	0.13	0.35
东菲律宾海深海黏土	0.07		0.02	0.12	0.33

注：计算所用Lu/Yb和Sm/Nd数据分别来自于：九州-帕劳海脊、西马里亚纳海脊和帕里西维拉海盆凝灰岩数据源于文献[52]；马里亚纳海槽玄武岩数据源于文献[53]；中国黄土数据源于文献[54]。JL7KGC01A柱状样的DF值据文献[22]计算；CD-1柱状样的DF值据文献[28]计算；GC3、GC4、GC5和BC11柱状样的DF值据文献[39]计算；挑战者深渊下沉颗粒的DF值引自文献[17]；东菲律宾海深海黏土DF值引自文献[19]。

海沟南坡的 L3 柱状样与前人研究的 JL7KGC-01A 柱状样地理位置相同, 2.9 Ma 以来的沉积过程分为 3 个阶段: 2.9~1.2 Ma 期间沉积速率为 83 cm/Ma, 1.2~0.7 Ma 期间为 183 cm/Ma, 而大约 0.7 Ma 后出现沉积缺失, 沉积层被富含南极底层水的底流侵蚀^[36]。研究区下深层的太平洋环流主要为南极底层水^[56-59], 它先流经马里亚纳海沟南坡, 随后小部分再经由马里亚纳海沟与雅浦海沟的连接处流入帕里西维拉海盆^[17, 60-61]。所以, 马里亚纳海沟南坡比帕里西维拉海盆的水动力更强, 导致 L3 柱状样遭受了较严重的底流侵蚀, 而 C-P19 柱状样沉积物得以更好地保存。

二者稀土元素特征对比结果显示(图 5), 大约 2.1~1 Ma 期间, 马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样的 ΣREY 含量整体较稳定, 呈略增趋势, 说明该时期马里亚纳海沟南坡的物源供给稳定且充足, 1 Ma 时 ΣREY 含量与帕里西维拉海盆的 C-P19 柱状样接近; 1~0.74 Ma 期间, L3 柱状样的 ΣREY 含量明显增加, 且 δEu 与 δCe 明显减小, 而 C-P19 的 ΣREY 含量相对稳定, 无明显波动, 反映该时期海沟南坡沉积环境动荡, 物源供给增加, 而帕里西维拉海盆内沉积环境和物源供给均相对稳定; 0.74 Ma 之后马里亚纳海沟南坡受到活跃的南极底层水影响, 沉积层遭受侵蚀, 出现沉积中断, 而在 0.74~0.22 Ma 期间帕里西维拉海盆 ΣREY 含量出现小幅波动, 该时期水动力条件可能较之前有所增强, 但物源供给整

体仍较稳定; 0.22 Ma 之后 C-P19 的 ΣREY 含量呈明显递减趋势, 虽然该时期伊豆-小笠原弧 (Izu-Bonin arc) 存在明显的火山活动^[62], 增强的火山活动理应为较大的区域带来丰富的火山物质, 使得物源供给增加, 但可能也是受到中更新世以来愈发活跃的南极底层水影响^[17, 22, 36, 63], 底流的搬运作用将帕里西维拉海盆东南部的部分沉积物带去他处沉积, 使得该时期 C-P19 的物源供应不增反降。

前人研究表明, 含长石类矿物的火山物质输入会使海相沉积物呈现明显的 Eu 正异常^[22, 64], C-P19 和 L3 柱状样沉积物相近的 δEu 异常结果也与之之前的 DF 判别结果一致, 表明火山物质是二者沉积物物源的主要贡献者。由于当海水处于强氧化状态时, Ce^{3+} 可氧化成为 Ce^{4+} , 并形成 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 沉淀析出, 使得该过程中出现 Ce 负异常现象^[17, 22, 65-67]。由图 5 可知, C-P19 和 L3 均表现出明显的 Ce 负异常, 表明沉积物形成时期海水处于相对氧化的条件下, 且 L3 柱状样的 Ce 负异常程度明显比 C-P19 大得多, 说明其氧化程度也较帕里西维拉海盆更高。上述 Ce 负异常结果也进一步证实了富氧的南极底层水^[68]在马里亚纳海沟南坡更加活跃。

4 结论

(1) 基于重矿物种类及其组合特征可知, 研究区沉积物来源以火山源为主, 帕里西维拉海盆沉积

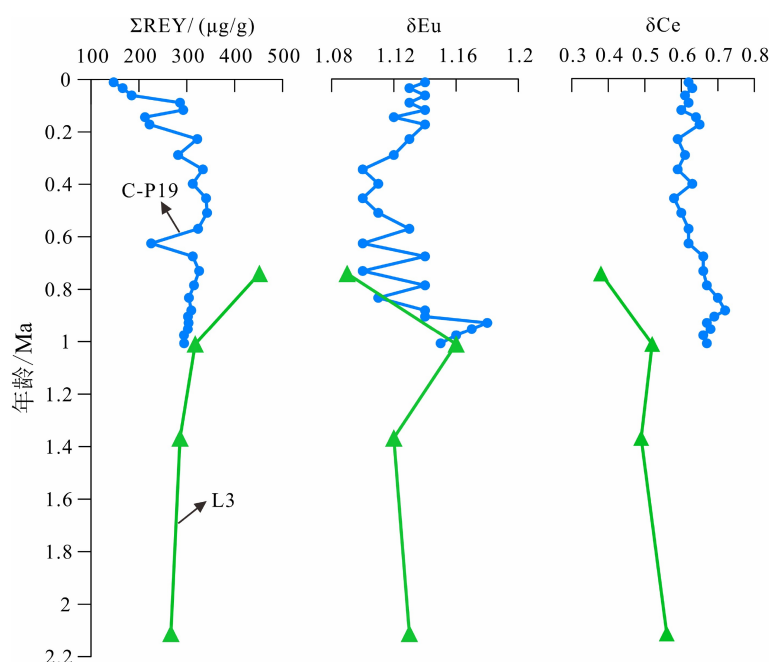


图 5 马里亚纳海沟南坡和帕里西维拉海盆柱状沉积物稀土参数的垂向对比

蓝色圆点表示 C-P19 柱状样, 绿色三角表示 L3 柱状样, 其中 C-P19 柱状样的年龄引自文献 [55], L3 柱状样的年龄引自文献 [36]。

Fig.5 Vertical comparison of REE parameters of core sediments on the south slope of Mariana Trench and in the Parece Vela Basin

Blue dots represent the core C-P19, green triangles represent the core L3, the ages of the core C-P19 and

L3 were cited from reference [55] and [36] respectively.

物中的矿物成熟度比马里亚纳海沟南坡高, 且马里亚纳海沟南坡碎屑矿物中的重矿物含量比帕里西维拉海盆高, 说明马里亚纳海沟南坡以近源沉积的海脊火山物质为主, 火山源碎屑物质对沉积物来源的贡献占比高, 而帕里西维拉海盆沉积物中除了火山物质可能还有部分经远距离搬运而来的以稳定矿物为主的沉积物。

(2) 马里亚纳海沟南坡 L3 柱状样沉积物中 ΣREE 变化范围为 266.67~451.61 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 330.41 $\mu\text{g/g}$, 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物中 ΣREE 变化范围为 147.15~342.29 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 282.25 $\mu\text{g/g}$; 二者轻稀土相对重稀土均较富集, 呈明显 Ce 负异常和 Eu 正异常, 且 REE 北美页岩标准化配分曲线具有较好地一致性, 表明二者虽稀土含量差异较大但是沉积物的来源相近。

(3) 研究区沉积物稀土元素总量与锆石含量呈正相关, 但与粒度之间并无明显相关性。物源判别函数 (DF) 结果表明, 帕里西维拉海盆—马里亚纳海沟体系的沉积物来源具有相似性, 其中西马里亚纳海脊剥蚀下来的火山物质对研究区的物质来源贡献最大; 来自中国内陆黄土的陆源风尘物质对研究区的物源供给有一定贡献, 但是, 其贡献程度与火山物质相比要小得多, 且在马里亚纳海沟南坡, 亚

洲风尘对物源的贡献与帕里西维拉海盆相比更小。

(4) C-P19 和 L3 柱状样沉积物形成时期海水均处于相对氧化的条件下, 南极底层水在马里亚纳海沟南坡更加活跃, 其沉积物形成时期对应的底层水氧化程度也更高, 与此同时, 沉积物遭受底层水的侵蚀作用也较帕里西维拉海盆更强。

致谢: 本文样品由“马沟计划”首个调查航次和“西太平洋中南部水体综合调查航次及马里亚纳海沟综合试验航次”取得, 调查队成员及全体船员为此付出了艰辛的劳动; 中科院南海海洋研究所的徐维海副研究员和田雨杭博士在分样工作中给予了指导和帮助; 中国海洋大学海洋地球科学学院的张爱滨老师在 ICP-MS 测试过程中给予了极大的帮助, 在此谨表谢意。

参考文献 (References)

- [1] 金性春. 大洋钻探与西太平洋构造[J]. 地球科学进展, 1995, 10(3): 234-239. [JIN Xingchun. Ocean drilling program and tectonics of the Western Pacific region [J]. Advance in Earth Sciences, 1995, 10(3): 234-239.]
- [2] 秦蕴珊, 尹宏. 西太平洋——我国深海科学研究的优先战略选区[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 245-248. [QIN Yunshan, YIN Hong.

- Western Pacific: The strategic priority in China deep sea research [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 245-248.]
- [3] 宋晓晓, 李春峰. 西太平洋科学大洋钻探的地球动力学成果[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(1): 17-30. [SONG Xiaoxiao, LI Chunfeng. Geodynamic results of scientific ocean drilling in the western Pacific [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(1): 17-30.]
- [4] 张国良, 王帅, 张吉, 等. 西太平洋若干沟-弧-盆体系及板内岩浆成因研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1220-1234. [ZHANG Guoliang, WANG Shai, ZHANG Ji, et al. Proceedings of subduction system and intra-oceanic volcanism of the western Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1220-1234.]
- [5] 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 62(9): 1340-1350. [ZHU Rixiang, XU Yigang. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(9): 1340-1350.]
- [6] 姜素华, 张雯, 李三忠, 等. 西北太平洋洋陆过渡带新生代盆地构造演化与油气分布特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(4): 839-857. [JIANG Suhua, ZHANG Wen, LI Sanzhong, et al. Cenozoic oil-gas distribution and tectonic evolution of the basins in the Northwest Pacific continent-ocean connection zone [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(4): 839-857.]
- [7] 殷征欣, 李正元, 沈泽中, 等. 西太平洋帕里西维拉海盆不对称性发育特征及其成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(1): 218-229. [YIN Zhengxin, LI Zhengyuan, SHEN Zezhong, et al. Asymmetric geological developments and their geneses of the Parece Vela Basin in Western Pacific Ocean [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2019, 49(1): 218-229.]
- [8] Andrews J E. Morphologic evidence for reorientation of sea-floor spreading in the West Philippine Basin [J]. *Geology*, 1980, 8(3): 140-143.
- [9] 林美华, 李乃胜. 菲律宾海周边的深海沟地貌[J]. *海洋科学*, 1998(6): 29-31. [LIN Meihua, LI Naisheng. The surrounding trench geomorphology of Philippine Sea [J]. *Marine Sciences*, 1998(6): 29-31.]
- [10] 林美华, 李乃胜. 西菲律宾海中央断裂带地貌学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 39-44. [LIN Meihua, LI Naisheng. Geomorphic study of the central rift zone in the west Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 39-44.]
- [11] 傅命佐, 刘乐军, 郑彦鹏, 等. 琉球“沟-弧-盆系”构造地貌: 地质地球物理探测与制图[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1447-1460. [FU Mingzuo, LIU Lejun, ZHENG Yanpeng, et al. Structural geomorphology of “trench arc basin system” in Ryukyu: geological geophysical exploration and mapping [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(14): 1447-1460.]
- [12] 张斌, 李广雪, 黄继峰. 菲律宾海构造地貌特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(2): 79-88. [ZHANG Bin, LI Guangxue, HUANG Jifeng. The tectonic geomorphology of the Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(2): 79-88.]
- [13] 黄杰, 万世明, 张国良, 等. 海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 77-85. [HUANG Jie, WAN Shiming, ZHANG Guoliang, et al. Impact of seafloor topography on distribution of clay minerals in the east Philippines Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 77-85.]
- [14] 肖春晖, 王永红, 林间. 海沟沉积物研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(6): 27-38. [XIAO Chunhui, WANG Yonghong, LIN Jian. Research progress on ocean trench sedimentation [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(6): 27-38.]
- [15] 林刚, 陈琳莹, 罗敏, 等. 西太平洋新不列颠海沟表层沉积物的地球化学特征及其物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 12-27. [LIN Gang, CHEN Linying, LUO Min, et al. The geochemical characteristics of the surface sediments in the New Britain Trench of the Western Pacific Ocean and their implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 12-27.]
- [16] 谢一璇, 杨小强, 张伙带, 等. 西太平洋深海沉积物记录的~80 ka以来风尘物质输入与东亚冬季风强度[J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 855-868. [XIE Yixuan, YANG Xiaoqiang, ZHANG Huodai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from Western Pacific since ~80 ka [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(5): 855-868.]
- [17] Xiao C H, Wang Y H, Tian J W, et al. Mineral composition and geochemical characteristics of sinking particles in the Challenger Deep, Mariana Trench: Implications for provenance and sedimentary environment [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2020, 157: 103211.
- [18] 任建业, 李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 203-213. [REN Jianye, LI Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 203-213.]
- [19] 徐兆凯, 李安春, 蒋富清, 等. 东菲律宾海沉积物的地球化学特征与物质来源[J]. *科学通报*, 2008, 53(6): 695-702. [XU Zhaokai, LI Anchun, JIANG Fuqing, et al. Geochemical characteristics and material sources of sediments in the East Philippine Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 695-702.]
- [20] 徐兆凯, 李铁刚, 李安春. 东菲律宾海表层沉积物来源的稀土证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(2): 1-7. [XU Zhaokai, LI Tiegang, LI Anchun. Provenance of surficial sediments of the east Philippine Sea: evidence from rare earth elements [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(2): 1-7.]
- [21] Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 535-539.
- [22] 王汾连, 何高文, 王海峰, 等. 马里亚纳海沟柱状沉积物稀土地球化学特征及其指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 67-75. [WANG Fenlian, HE Gaowen, WANG Haifeng, et al. Geochemistry of rare earth elements in a core from Mariana Trench and its significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 67-75.]
- [23] 李景瑞, 刘升发, 冯秀丽, 等. 孟加拉湾中部表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 41-50. [LI Jingrui, LIU Shengfa, FENG Xiuli, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in mid-Bengal Bay and implications

- for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 41-50.]
- [24] 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.]
- [25] Liu J G, Yan W, Xu W H, et al. Sediment provenance in the western Pacific warm pool from the last glacial maximum to the early Holocene: Implications for ocean circulation and climatic change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 493: 55-63.
- [26] 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*, 2019, 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 & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 69-82.]
- [27] 石学法, 陈丽蓉. 西菲律宾海晚第四纪沉积地球化学特征[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(2): 124-131. [SHI Xuefa, CHEN Lirong. Late Quaternary sedimentary geochemical characteristics of the west Philippines Sea [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1995, 26(2): 124-131.]
- [28] Jiang Z Z, Sun Z L, Liu Z Q, et al. Rare-earth element geochemistry reveals the provenance of sediments on the southwestern margin of the Challenger Deep [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(3): 998-1009.
- [29] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 61-72. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, LI Kunye, et al. Study on minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 61-72.]
- [30] 臧绍先, 宁杰远. 菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用及其对东亚构造运动的影响[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(2): 188-197. [ZANG Shaoxian, NING Jieyuan. Interaction between Philippine Sea Plate (PH) and Eurasia (EU) Plate and its influence on the movement eastern Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(2): 188-197.]
- [31] 靳宁. 帕里西维拉海盆西北部海域粘土矿物分布特征研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006. [JIN Ning. Clay mineral distribution in the sediments of the northwest Parece Vela Basin[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006.]
- [32] 孙晗杰, 李铁刚, 孙荣涛, 等. 西菲律宾海第四纪钙质超微化石及微玻陨石地层学[J]. *科学通报*, 2011, 56(21): 1749-1755. [SUN Hanjie, LI Tiegang, SUN Rongtao, et al. Calcareous nannofossil bioevents and microtektite stratigraphy in the Western Philippine Sea during the Quaternary [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(21): 1749-1755.]
- [33] 明洁, 李安春, 孟庆勇, 等. 东菲律宾海帕里西维拉海盆第四纪黏土矿物组合特征及物源分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(4): 139-148. [MING Jie, LI Anchun, MENG Qingyong, et al. Quaternary assemblage characteristic and provenance of clay minerals in the Parece Vela Basin of the east Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(4): 139-148.]
- [34] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [35] 周宇, 蒋富清, 徐兆凯, 等. 近2Ma帕里西-维拉海盆沉积物中碎屑组分粒度特征及其物源和古气候意义[J]. *海洋科学*, 2015, 39(9): 86-93. [ZHOU Yu, JIANG Fuqing, XU Zhaokai, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Parece Vela Basin and its implication of provenance and palaeoclimate over the last 2 Ma [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(9): 86-93.]
- [36] Deng X G, Yi L, Paterson G A, et al. Magnetostratigraphic evidence for deep-sea erosion on the Pacific Plate, south of Mariana Trench, since the middle Pleistocene: potential constraints for Antarctic bottom water circulation [J]. *International Geology Review*, 2016, 58(1): 49-57.
- [37] Jiang F Q, Zhu X, Li T G, et al. Increased dust deposition in the Parece Vela Basin since the mid- Pleistocene inferred from radiogenic Sr and Nd isotopes [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 173: 83-95.
- [38] 王薇, 徐兆凯, 冯旭光, 等. 西菲律宾海现代风尘物质组成特征及其物源指示意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 559-568. [WANG Wei, XU Zhaokai, FENG Xuguang, et al. Composition characteristics and provenance implication of modern dust in the west Philippine Sea [J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 559-568.]
- [39] Luo M, Algeo T J, Tong H P, et al. More reducing bottom-water redox conditions during the Last Glacial Maximum in the southern Challenger Deep (Mariana Trench, western Pacific) driven by enhanced productivity [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2018, 155: 70-82.
- [40] 明洁. 东菲律宾海帕里西维拉海盆第四纪沉积特征和物质来源及其古环境意义[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013. [MING Jie. The characteristics and provenance of the sediment in the Parece Vela Basin since the Quaternary and their environmental implications[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [41] Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[M]//Origin and Distribution of the Elements. New York: Pergamon Press, 1968: 889-912.
- [42] Bau M, Dulski P. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, transvaal supergroup, South Africa [J]. *Precambrian Research*, 1996, 79(1-2): 37-55.
- [43] 刘宝林, 王亚平, 王吉中, 等. 南海北部陆坡海洋沉积物稀土元素及物源和成岩环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 17-23. [LIU Baolin, WANG Yaping, WANG Jizhong, et al. Geochemical characters of REE in the seafloor sediment in northern continental slope of the South China Sea and analysis of source of material and diagenesis environment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 17-23.]
- [44] Condie K C. Another look at rare earth elements in shales [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.

- [45] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-190.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 冯旭文, 石学法, 黄永祥, 等. 长江口东南泥质区百年来稀土元素的组成及控制因素[J]. *地球化学*, 2011, 40 (5): 464-472. [FENG Xuwen, SHI Xuefa, Huang Yongxiang, et al. Distributions and main controlling factors of rare earth elements in core sediments from the Changjiang Estuary mud area over the last 100 years [J]. *Geochimica*, 2011, 40 (5): 464-472.]
- [49] 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.]
- [50] 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 Geoscientica Sinica*, 2018, 39 (1): 37-44.]
- [51] 万世明, 徐兆凯. 西太平洋风尘沉积记录研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48 (6): 1208-1219. [WAN Shiming, XU Zhaokai. Research progress on eolian dust records in the west Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48 (6): 1208-1219.]
- [52] Migdisov A A, Miklishansky A Z, Saveliev B V, et al. Neutron activation analysis of rare earth elements and some other trace elements in volcanic ashes and pelagic clays[C]//Deep Sea Drilling Project Leg 59. Washington: US Government Printing Office, 1981: 653-668.
- [53] 田丽艳, 赵广涛, 陈佐林, 等. 马里亚纳海槽热液活动区玄武岩的岩石地球化学特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2003, 33 (3): 405-412. [TIAN Liyan, ZHAO Guangtao, CHEN Zuolin, et al. The preliminary study of petrological geochemistry of basalts from hydrothermal activity regions, Mariana trough [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33 (3): 405-412.]
- [54] 文启忠, 刁桂仪, 耿安松, 等. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-285. [WEN Qizhong, DIAO Guiyi, GENG Ansong, et al. Loess geochemistry in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-285.]
- [55] Xiao C H, Wang Y H, Lin J. Constraints of magnetostratigraphic and mineralogical data on the provenance of sediments in the Parece Vela Basin of the western Pacific [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 196: 104373.
- [56] Warren B A, Voorhis A D. Velocity measurements in the deep western boundary current of the South Pacific [J]. *Nature*, 1970, 228 (5274): 849-850.
- [57] Wunsch C, Hu D X, Grant B. Mass, heat, salt and nutrient fluxes in the South Pacific Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13 (5): 725-753.
- [58] Taft B A, Hayes S P, Friederich G E, et al. Flow of abyssal water into the Samoa Passage [J]. *Deep-Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers*, 1991, 38 (Suppl. 1): S103-S128.
- [59] Tsimplis M N, Bacon S, Bryden H L. The circulation of the subtropical South Pacific derived from hydrographic data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (C10): 21443-21468.
- [60] Kato F, Kawabe M. Volume transport and distribution of deep circulation at 165°W in the North Pacific [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56 (12): 2077-2087.
- [61] Zhai F G, Gu Y Z. Abyssal circulation in the Philippine Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19 (2): 249-262.
- [62] Taylor B. Rifting and the volcanic-tectonic evolution of the Izu-Bonin-Mariana arc[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX, USA, 1992, 126: 627-651.
- [63] Lee I, Ogawa Y. Bottom-current deposits in the Miocene-Pliocene Misaki Formation, Izu forearc area, Japan [J]. *The Island Arc*, 1998, 7 (3): 315-329.
- [64] Sverjensky D A. Europium redox equilibria in aqueous solution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 67 (1): 70-78.
- [65] Singh P, Rajamani V. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, Southern India: implication to source area weathering and sedimentary processes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65 (18): 3093-3108.
- [66] 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.]
- [67] 邓义楠, 任江波, 郭庆军, 等. 太平洋西部富稀土深海沉积物的地球化学特征及其指示意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34 (3): 733-747. [DENG Yinan, REN Jiangbo, GUO Qingjun, et al. Geochemistry characteristics of REY-rich sediment from deep sea in Western Pacific, and their indicative significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34 (3): 733-747.]
- [68] Johnson G C. Quantifying Antarctic bottom water and north Atlantic deep water volumes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (C5): C05027.