

西南印度洋中脊轴部裂谷(49.58°E)沉积物岩心地球化学特征及物源

黄永金^{1,2}, 陶春辉^{1,2,3}, 梁锦^{1,2}, 廖时理^{1,2}, 杨伟芳^{1,2}

HUANG Yongjin^{1,2}, TAO Chunhui^{1,2,3}, LIANG Jin^{1,2}, LIAO Shili^{1,2}, YANG Weifang^{1,2}

1.自然资源部第二海洋研究所,浙江 杭州 310012;

2.自然资源部海底科学重点实验室,浙江 杭州 310012;

3.上海交通大学海洋学院,上海 200030

1.Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

2.Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

3.School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

摘要:目前有关西南印度洋中脊沉积物的研究多集中在洋脊翼表层沉积物,对洋脊轴部裂谷沉积物的研究较匮乏,制约了对该区沉积物物质来源和沉积环境的深入认识。针对大洋49航次在洋脊轴部裂谷(东经49.58°)获取的沉积物岩心(GC03)进行了全岩样品主量、微量、稀土元素和Y(REY)含量测试分析,探讨研究区沉积物的物质来源和沉积环境。结果表明,GC03岩心样品富CaO、LOI(烧失量)和Sr,指示以钙质生物沉积占主导,并混有玄武岩碎屑。稀土元素总量(Σ REY)低,平均为 54.3×10^{-6} ,稀土元素球粒陨石标准化配分图显示轻稀土元素富集,Ce和Eu显著负异常特征。其中L2层(83~87 cmbsf)富集Cu、Zn、Fe、Co等金属元素及较低的 $100 \times \text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值,揭示存在热液组分输入。 Ce_{anom} 值与微量元素 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})-\text{U}/\text{Th}$ 判别指标指示,研究区总体为偏氧化环境,部分层位显示还原特征。

关键词:西南印度洋中脊;沉积物岩心;地球化学;物质来源;沉积环境

中图分类号:P736.21;P59 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0320-10

Huang Y J, Tao C H, Liang J, Liao S L, Yang W F. Geochemistry and provenance of the sediment core from the rift valley of the Southwest Indian Ridge (49.58°E). *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 320-329

Abstract: The current research on the sediments of the Southwest Indian Ridge (SWIR) mainly focuses on the surface sediments of the flank of the ridge, but lack of research on its ridge axis restricts the in-depth understanding of the sediment sources and sedimentary environment in this area. Based on the major element, trace element, REE and Y assay of a sediment core (GC03) collected from SWIR 49.58°E during Chinese DY-49 Cruise, the material source and sedimentary environment of the sediments in the study area were discussed. The results show that the bulk samples are enriched in CaO, LOI and Sr, indicating that calcareous biodeposition is dominant and mixed with basalt debris. The content of the Σ REY is low, with average value of 54.3×10^{-6} , and the chondrite-normalized REY distribution patterns show the enrichment of LREE compared to HREE and significant negative Ce and Eu anomaly. The enrichment of

收稿日期:2021-01-27;修订日期:2021-02-08

资助项目:国家重点研发计划项目《蛟龙号载人潜水器在热液区的科学应用》(编号:2017YFC0306603)、国家自然科学基金青年基金项目《西南印度洋龙旗矿化区烟囱体形成过程重构:来自微区元素和同位素的信息》(批准号:41806076)、自然资源部第二海洋研究所基本科研业务专项《西南印度洋脊龙旗热液区枝状硫化物烟囱体的形成机制研究》(编号:JG1905)和大洋“十三五”资源环境专项《多金属硫化物合同区资源勘探与评价》(编号:DY135-S1-1-02、DY135-S1-1-08、DY135-S1-1-09)

作者简介:黄永金(1994-),男,硕士,从事海洋地质研究。E-mail:huangyongjinmail@163.com

通信作者:陶春辉(1968-),男,博士,研究员,从事洋中脊海底热液活动及多金属硫化物资源调查研究。E-mail:taochunhu@mail@163.com

metal elements such as Cu, Zn, Fe and Co, and low $100 * Al / (Al + Fe + Mn)$ value characterizing samples from Layer L2(83–87 cmbsf) reveals the presence of a hydrothermal component input. The Ce_{anom} value and $V / (V + Ni) - U / Th$ discriminant diagram indicate that the study area is generally a stable oxidized environment except for reduction characteristics exhibited from partial samples.

Key words: Southwest Indian Ridge; sediment core; geochemistry; provenance; sedimentary environment

洋中脊(Mid-Ocean Ridges, MORs) 由于远离大陆, 陆源沉积较少, 通常被认为是缺乏沉积物的区域。然而, 在慢速和超慢速扩张洋脊的部分脊段具有较多的沉积物^[1-2]。这种分布的不均匀性可能是区域地形、火山/热液活动和构造作用造成的^[3]。此外, 洋中脊沉积物源繁杂, 以生物源为主, 含有少量陆源物质并混有幔源物质^[1, 4]; 而海底热液喷口附近的洋中脊环境沉积物受热液活动影响, 富集 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、As 等金属元素, 表现出有别于正常洋脊沉积的地球化学特征^[5-6]。自 1977 年洋中脊首次发现海底热液活动以来, 因其拥有巨大的金属矿床资源、极端环境下的生态群落等, 引起了全球科学家和政府的广泛关注和重视^[7-8]。洋中脊区域沉积物受热液活动直接或间接影响, 很好地保存记录了热液活动的原始地球化学信息^[6, 9], 是研究海底热液活动的重要窗口。

西南印度洋中脊是典型的超慢速扩张洋脊^[10]。近年来, 国内外学者对西南印度洋中脊沉积物类型、地球化学特征、沉积环境等做了大量研究, 取得了众多的阶段性成果^[11-16]。西南印度洋中脊沉积物大致可分为 3 种类型: 第一种为浅灰色、灰白色钙质生物沉积^[11-12]; 第二种为黑色、灰色、黄绿色硅质沉积, 含大量基岩碎屑及少量放射虫、硅藻等硅质生物^[4, 12]; 第三种为浅褐色、红褐色典型热液沉积^[13-15], 富集 Fe、Mn、Cu、Zn 等热液源金属元素。钙质沉积物是西南印度洋中脊的主要沉积类型, 其主要成分为碳酸盐, 这些碳酸盐来源于生物成因方解石, 方解石以钙质超微化石有孔虫及颗石藻的形态存在, 基岩碎屑与粘土矿物含量较低^[4, 11]。刘明等^[16]对钙质沉积物的稀土元素进行了研究, 发现其具有轻稀土元素略富集、明显的负 Ce 异常和正 Y 异常特征, 揭示钙质沉积物稀土元素以自生来源为主。黄大松等^[4]研究发现硅质沉积物富含 Si、Mg、Fe、Al 等元素, 主要为基性岩、超基性岩的风化产物。宋备等^[15]通过对西南印度洋中脊活动的龙旗和非活动的断桥热液区表层沉积物研究发现, 龙旗热液区沉积物富集 Cu、Zn、Fe、Co 等元素, 而断桥

明显富集 Pb 和 W, 这可能与 2 个热液区构造、围岩和热液活动等因素相关。前人^[4, 11]对西南印度洋中脊表层沉积物的微量元素特征和 Ce 异常值分析, 认为当前沉积环境偏氧化。

林震等^[17]对西南印度洋中脊北翼(33°59'S) 重力柱沉积物样品研究发现, 该区离热液区较远, 沉积物来源长期稳定, 以生物成因碳酸盐为主, 非生物组分主要为陆源风成物质, 含少量洋脊原生物质。目前, 有关西南印度洋中脊环境沉积物的研究多集中在洋脊翼表层沉积物, 对洋脊轴部沉积物的研究较少。本文以中国大洋 49 航次获取的西南印度洋中脊轴部的重力柱状样(GC03) 为研究对象, 开展了全岩主量、微量及稀土元素地球化学分析, 对研究区沉积物的物质来源和沉积环境进行了探讨。

1 地质背景

西南印度洋中脊(Southwest Indian Ridge, SWIR) 西起布维三联点(Bouvet Triple Junction, BTJ), 东至罗德里格斯三联点(Rodrigues Triple Junction, RTJ), 全长约 8000 km, 是非洲板块和南极洲板块的重要分界线^[18]。SWIR 为典型的超慢速扩张洋脊(全扩张速率约为 14 mm/a)^[10], 该洋脊轴向裂谷被一系列南北向的转换断层(如 Indomed、Gallieni 等)切割。本研究采样点位于 SWIR 的中段轴部(图 1)。西南印度洋中脊已发现多处热液区(点)^[8, 19-21], 距离本研究采样点最近的是龙旗-1 热液区, 位于采样点东面约 10 km 处。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

本文研究样品为 2018 年大洋 49 航次“向阳红 10 号”船在西南印度洋中脊通过重力柱状取样器采集的沉积物岩心(GC03), 样品总长 250 cm, 采样位置为东经 49.58°、南纬 37.79°, 距离龙旗-1 热液区约 10 km(图 1)。GC03 采样水深 3777 m, 位于该区 CCD(碳酸盐补偿深度)界面之上^[22]。样品整体

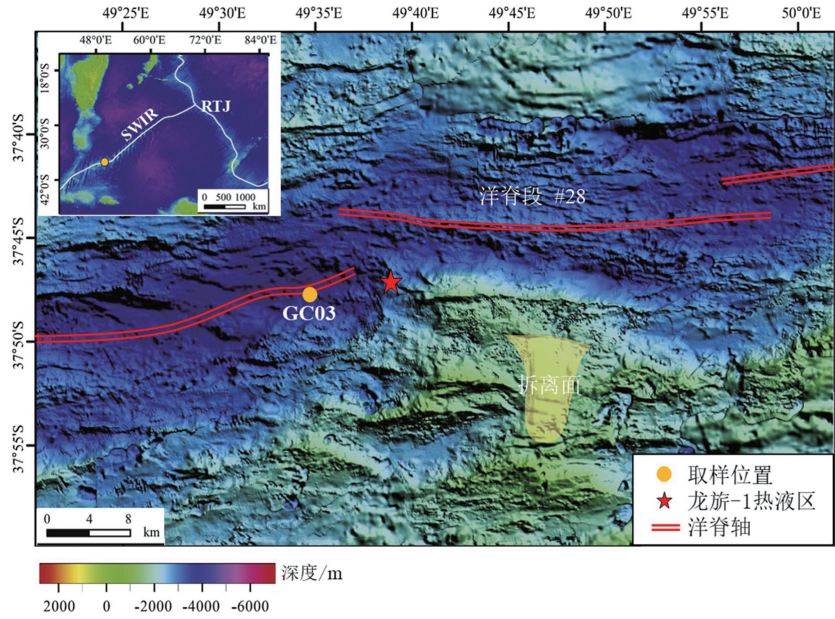


图 1 GC03 岩心采样位置图(底图据参考文献[13]修改,左侧插图显示 GC03 区域位置)

Fig. 1 Sampling location of the core GC03(the left inset shows the regional location of the GC03)

为浅灰色-淡黄色钙质软泥,在 50 cmbsf、85 cmbsf 和 205 cmbsf 周围 5 cm 左右见细微颜色变化,为淡黄绿色-淡黄棕色。GC03 样品主要组成为钙质超微化石(图 2),少量基岩碎屑混入。

2.2 分析方法

本文样品采用非连续取样,以 2 cm 厚度一个样,共获取 80 个分割样。对全部样品进行了全岩主量、微量和稀土元素的测试分析。测试分析在澳实分析检测有限公司完成,在分析前挑出肉眼可见的岩屑,以减少大颗粒岩屑对沉积物组分的影响。其中主量元素采用 X 荧光光谱法测定,仪器型号为 PANalytical PW2424。在分析前,往试样中加入包含

硝酸锂在内的硼酸锂-偏硼酸锂助熔剂,充分混合后,在 1000℃高温下熔融约 1 h,熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片。插入 3 个标样(GBW07105, SARM-4 和 SARM-45)以控制数据准确性,数据的测量误差小于 5%。

微量元素采用 ME-MS61r 测试分析,仪器为 Agilent 7700x ICP-MS。在分析前,沉积物样品在玛瑙研钵中被研磨至颗粒径小于 74 μm(200 目)。然后称量每个样品约 250 mg,并加入 HClO₄, HNO₃ 和 HF 混合液消解。蒸发溶液直至干燥,残留物用稀盐酸浸出并溶解,然后分析溶解的样品。参考样品 GBM908-10 和 MRGeo08 用作数据质量控制的

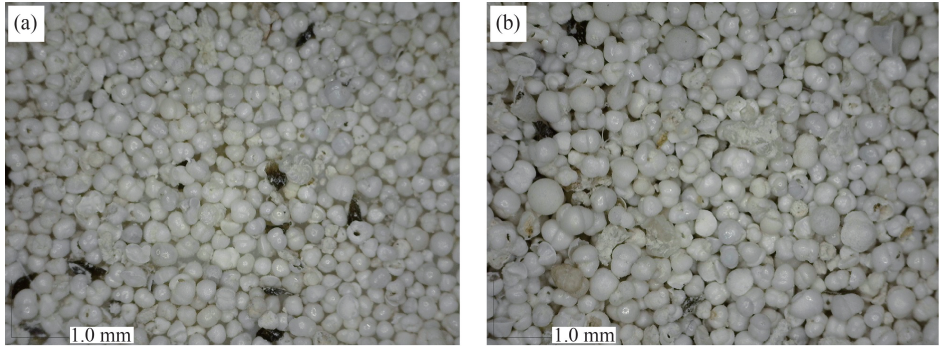


图 2 研究区 GC03 沉积物岩心显微照片

Fig. 2 Micrographs of GC03 sediment core in study area

内部标准。结果已对元素间的光谱干扰进行了校正。数据的测量误差小于 10%。

特征如图 3 所示,详细的全岩地球化学测试结果见表 1。

3 分析结果

GC03 沉积物岩心样品主量和微量元素随深度分布

3.1 主量和微量元素特征

全岩地球化学结果显示,沉积物中 CaO 的含量最高,变化范围在 37.8%~47.5%之间(平均 45%),低于背景洋脊翼沉积物(平均 50.97%)。其他主量

表 1 GC03 岩心样品主量、微量和稀土元素测试结果

Table 1 Assay results of major, trace elements and REE of the sediment core GC03

元素	GC03(<i>n</i> =80)					BGS ^[13] (<i>n</i> =4)				
	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差
CaO	37.80	47.50	45.03	45.30	2.00	50.53	51.46	50.97	50.94	0.39
SiO ₂	5.95	15.82	7.54	7.24	1.62	2.51	3.71	3.12	3.13	0.62
Al ₂ O ₃	1.42	5.28	1.83	1.73	0.53	0.68	0.99	0.81	0.79	0.13
TFe ₂ O ₃	0.89	3.40	1.42	1.30	0.48	0.44	0.62	0.55	0.56	0.08
K ₂ O	0.28	0.42	0.33	0.32	0.03	0.16	0.19	0.18	0.18	0.02
MgO	0.62	5.09	1.08	0.85	0.70	0.37	0.42	0.38	0.37	0.03
MnO	0.02	0.08	0.05	0.05	0.01	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01
Na ₂ O	1.28	2.22	1.58	1.56	0.19	0.97	1.66	1.24	1.17	0.31
P ₂ O ₅	0.04	0.08	0.06	0.06	0.01	0.02	0.13	0.06	0.05	0.05
TiO ₂	0.07	0.25	0.09	0.09	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01
Mo	0.06	0.41	0.21	0.20	0.08	0.35	0.44	0.40	0.40	0.04
Bi	0.06	0.11	0.09	0.09	0.01	0.04	0.07	0.06	0.06	0.01
Cu	35.60	344.00	75.59	64.80	41.62	11.60	21.60	18.05	19.50	4.58
Pb	3.50	7.50	5.08	4.90	0.76	3.20	8.70	4.70	3.45	2.67
Zn	22.00	56.00	27.20	26.00	6.31	13.00	15.00	14.25	14.50	0.96
Ag	0.01	0.11	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
As	7.70	13.90	10.87	10.85	1.32	1.70	2.10	1.90	1.90	0.18
Sb	0.16	0.45	0.26	0.24	0.08	0.13	0.17	0.15	0.15	0.02
Co	4.80	20.50	8.04	7.45	2.62	4.70	9.20	6.58	6.20	2.00
Ni	15.60	149.50	30.31	23.60	21.28	11.40	20.60	14.33	12.65	4.23
Cr	13.00	100.00	24.38	19.50	16.39	5.00	6.00	5.50	5.50	0.58
V	16.00	55.00	22.34	20.00	6.59	4.00	7.00	5.50	5.50	1.29
Y	12.80	17.40	14.57	14.20	1.04	9.00	15.60	11.75	11.20	2.91
Sr	1140.00	1800.00	1659.88	1675.00	106.34	—	—	—	—	—
Th	0.97	1.90	1.42	1.41	0.14	—	—	—	—	—
U	0.30	3.70	0.98	0.70	0.78	—	—	—	—	—
ΣREE	47.83	66.16	54.31	53.01	4.60	34.94	54.07	43.37	42.24	9.12
LREE	26.85	40.56	32.64	32.17	3.14	21.15	31.13	25.67	25.21	5.05
HREE	6.24	8.82	7.10	6.93	0.64	13.79	22.94	17.70	17.04	4.13
LREE/HREE	3.48	5.14	4.61	4.59	0.29	1.36	1.53	1.46	1.47	0.08
δEu *	0.61	0.73	0.66	0.66	0.03	0.67	0.75	0.71	0.70	0.03
δCe *	0.55	0.65	0.58	0.58	0.02	0.52	0.65	0.57	0.56	0.06
Ce [*] _{anom}	-0.27	-0.19	-0.25	-0.25	0.02	-0.31	-0.21	-0.27	-0.27	0.04

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶;δEu=2×(Eu/Eu_N)/(Sm/Sm_N+Gd/Gd_N),δCe=2×(Ce/Ce_N)/(La/La_N+Pr/Pr_N),Ce_{anom}=lg(3Ce_N/(2La_N+Nd_N)),“*”表示采用球粒陨石标准化;“—”表示数据缺失;BGS—西南印度洋表层背景沉积物,离洋中脊大于 60 km,代表洋盆附近沉积

元素含量由高到低依次是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO ，这些主量元素含量普遍比背景沉积物高(表 1)，其中高 Al_2O_3 、 TiO_2 含量可能代表碎屑组分的加入。样品烧失量平均值为 41.01%，低于背景沉积物(平均 43.12%)。从沉积物主量元素深度分布曲线(图 3)可以发现， CaO 上段(<125 cmbsf)含量较下段高，部分深度含量较低，与 MnO 具有相似的变化规律。 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 和 TiO_2 具有一致的变化规律，整体上随深度增加，呈现出微弱的增高趋势，部分深度含量增高明显。 Na_2O 和 K_2O 随着剖面深度增加，含量逐渐增高。 P_2O_5 整体分布较均一。

微量元素中， Sr 和 Ba 含量最高，其中 Sr 为 $1140\times 10^{-6}\sim 1800\times 10^{-6}$ (平均 1660×10^{-6})， Ba 为 $290\times 10^{-6}\sim 950\times 10^{-6}$ (平均 574.3×10^{-6})。 Sr 含量高于洋脊翼(33°59'S)沉积物岩心(水深 4430 m)中的 Sr

(1229×10^{-6})，与 Sr 的丰度总体呈水深加大、含量减少特点一致^[11]； Cu 、 Zn 、 V 、 Ni 、 Cr 、 Zr 等含量也较高，为 $10\times 10^{-6}\sim 344\times 10^{-6}$ 。其余元素，如 Mo 、 Bi 、 Hf 、 Th 、 U 等含量均较低(表 1)。利用 SPSS 软件对样品测试数据进行相关性分析，其相关系数分布如表 2 所示。

$100\times \text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值(MSI)被广泛作为判别含金属沉积物与远洋沉积物的重要指标，通常当 $\text{MSI}<40\%$ ^[6, 13-14]，指示受热液活动影响。根据 MSI 可将沉积柱分为 3 层(图 4)，上层 Layer 1 (以下简称 L1, 0~83 cmbsf)和底层 Layer 3 (以下简称 L3, 87~250 cmbsf)的平均 MSI 分别为 50.4% 和 48.4%，分别相似于背景沉积物(BGS, $\text{CaCO}_3>90\%$)和龙角区的非金属沉积物^[13]，而 Layer 2 (以下简称 L2, 83~87 cmbsf) MSI 为 38.3%，指示有热液物质的输入。

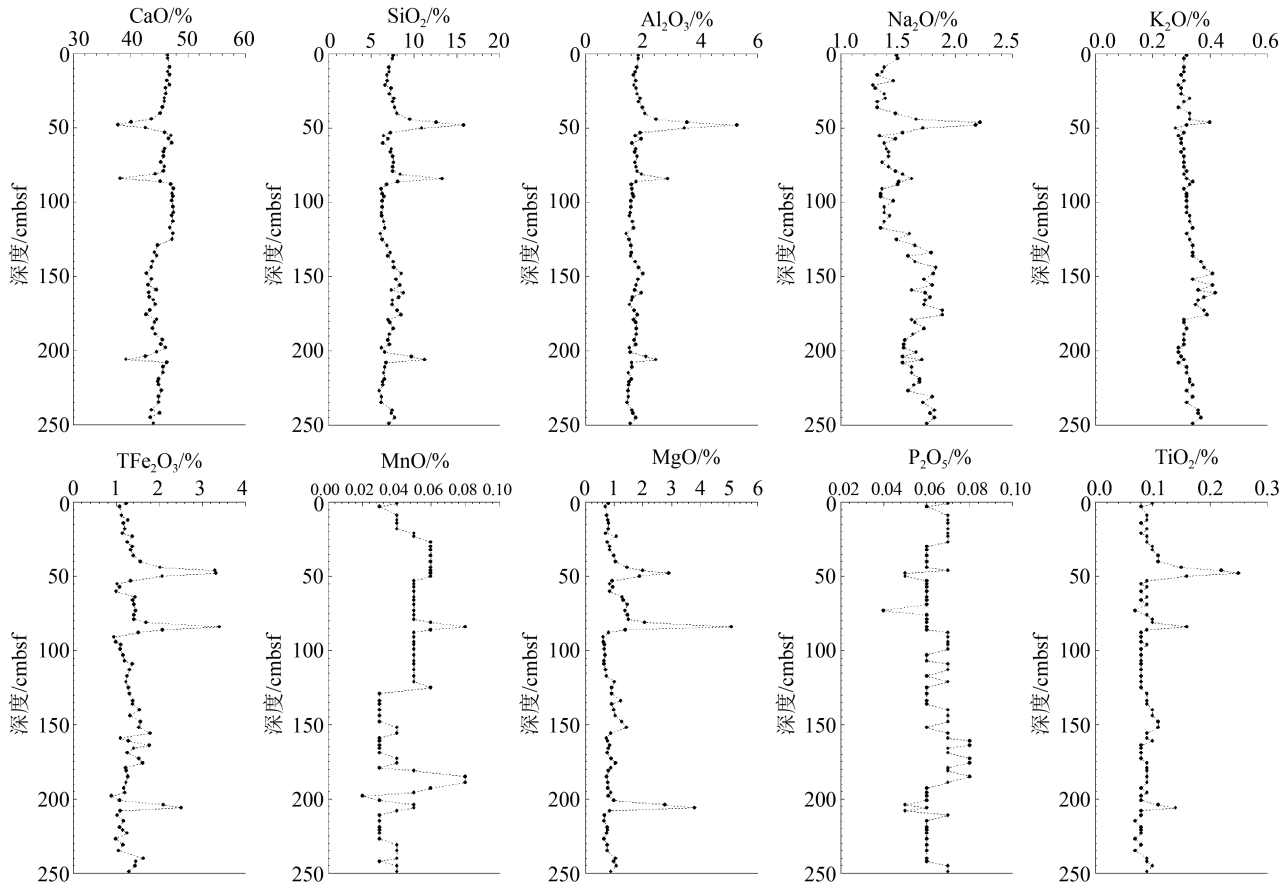
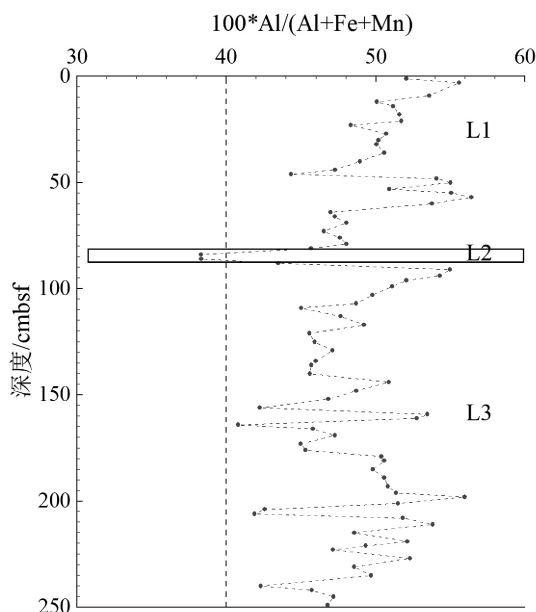


图 3 GC03 主量元素垂向分布图

Fig. 3 Vertical distribution of major elements in the core GC03

图 4 GC03 岩心 $100 * Al / (Al+Fe+Mn)$ 剖面图Fig. 4 Profile of $100 * Al / (Al+Fe+Mn)$ of the core GC03

3.2 稀土元素特征

研究区沉积物稀土元素总量 (ΣREY) 较低 (表 1), 范围在 $47.8 \times 10^{-6} \sim 66.2 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 54.3×10^{-6} , 高于 BGS^[13] (平均 43.4×10^{-6}), 低于该区洋脊玄武岩 (86.3×10^{-6})^[23]。轻稀土元素较重稀土元素相对富集 ($LREE/HREE = 3.5 \sim 5.1$), 轻、重稀土元素分馏程度显著 ($(La/Yb)_N = 3.68 \sim 6.61$)。经球粒陨石标准化^[24]后的稀土元素配分模式呈右倾 (图 5), δEu 和 δCe 值分别为 $0.61 \sim 0.73$ 和 $0.55 \sim 0.65$, 平均值分别为 0.66 和 0.58 , 呈现显著的负异常。

4 讨论

4.1 物质来源

沉积物中 CaO 与 LOI (烧失量) 的质量分数比范围为 $1.03 \sim 1.18$, 平均值为 1.10 , 与 $CaCO_3$ 中 CaO 和 CO_2 的原子质量之比 (约 1.27) 接近, 且 $CaO+LOI$ 质量分数基本在 80% 以上 (平均 86.04%), 表明其主要物质组成为碳酸钙。由镜下观察可知, 沉积物中的方解石为钙质超微化石有孔虫和颗石藻, 因此沉积物中的方解石为

生物成因。因为采样点水深处于 CCD 之上, 并未发生碳酸盐溶解作用。此外, 相关性分析 Ca 和 Sr 具有较明显的正相关关系 (表 2), 表明 Sr 可能以类质同像进入碳酸盐矿物 (方解石) 晶体中^[15, 25], 这与西南印度洋表层钙质沉积物的 Sr (1277×10^{-6}) 远高于硅质沉积 Sr (348×10^{-6}) 一致^[4]。垂向上, Sr 含量整体分布较均一, 底部含量略高于顶部, 极小值出现在 $40 \sim 50$ cmbsf 区间 (图 3), 表明非碳酸盐组分贡献增加。

Ca 与 Si 、 Al 、 Ti 、 Mg 等元素呈明显的负相关关系 (表 2), 这些元素主要来源于陆源碎屑和基岩风化产物^[17, 26]。研究区位于西南印度洋中脊中段裂谷且远离大陆 (距最近马达加斯加大于 1000 km), 陆源物质通过河流搬运难以直接到达, 风尘搬运输送也非常有限^[27]。研究区向北流的南极底层流^[28]可能携带南极大陆物质, 但受洋脊坡的阻挡, 大量的物质将沉积在西南印度洋中脊南坡^[17]。因此, 这些元素很可能来自于洋中脊区域内的基岩碎屑^[15, 29]。通过 $Mg-Fe-Al$ 判别图解 (图 6-a) 可知, 研究区沉积物中的碎屑组分主要为玄武岩屑。这些碎屑源元素含量远高于西南印度洋 BGS (图 6-b), 表明洋中脊区域具有更强的基岩碎屑稀释作用, 这与洋中脊环境下岩浆构造活动普遍强于洋盆一致。

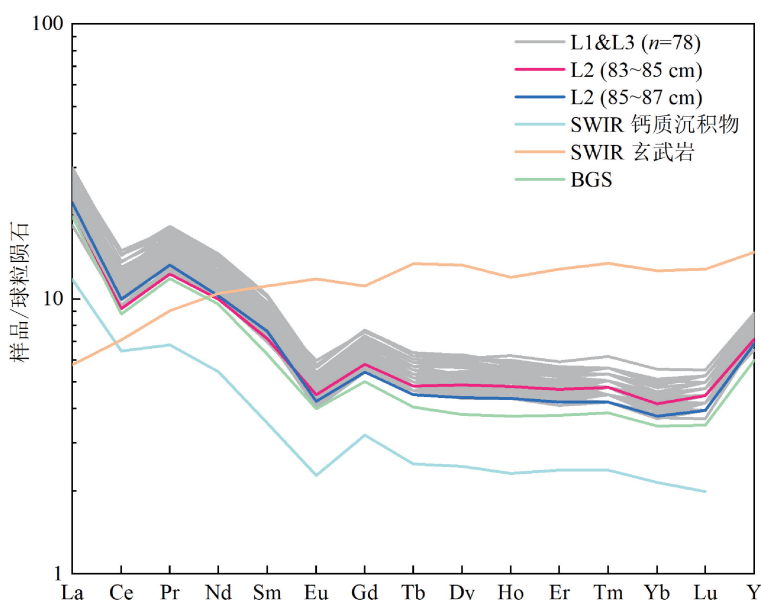


图 5 GC03 岩心和 BGS 样品稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (球粒陨石标准化数据据参考文献^[24], SWIR 钙质沉积物数据据参考文献^[11], SWIR 玄武岩据参考文献^[23])

Fig. 5 Chondrite-normalized REY distribution patterns of the GC03 core and BGS samples

表 2 GC03 岩心主量和微量元素相关系数 ($n=80$)
Table 2 The correlated coefficient of major and trace elements in GC03 core

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Mo	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	As	Sb	Ba	Sr	Zr	Hf	Th	U	Σ REY
CaO	1																											
SiO ₂	-0.857	1																										
Al ₂ O ₃	-0.678	0.917	1																									
TFe ₂ O ₃	-0.816	0.938	0.810	1																								
K ₂ O	-0.401	0.192	0.016	0.239	1																							
MgO	-0.734	0.810	0.633	0.838	-0.057	1																						
MnO	-0.081	0.348	0.383	0.392	-0.338	0.382	1																					
Na ₂ O	-0.774	0.533	0.443	0.508	0.629	0.266	-0.228	1																				
P ₂ O ₅	0.043	-0.159	-0.245	-0.166	0.477	-0.335	-0.131	0.142	1																			
TiO ₂	-0.732	0.924	0.955	0.865	0.123	0.672	0.365	0.508	-0.178	1																		
LOI	0.612	-0.917	-0.932	-0.870	0.070	-0.774	-0.494	-0.262	0.324	-0.902	1																	
Mo	-0.190	0.282	0.387	0.265	-0.130	0.179	0.413	0.157	-0.212	0.432	-0.327	1																
V	-0.746	0.866	0.854	0.829	0.200	0.632	0.262	0.594	-0.133	0.850	-0.804	0.246	1															
Cr	-0.767	0.901	0.797	0.872	-0.086	0.960	0.386	0.329	-0.368	0.809	-0.878	0.273	0.742	1														
Co	-0.726	0.740	0.556	0.837	0.149	0.828	0.321	0.415	-0.266	0.582	-0.673	0.143	0.663	0.779	1													
Ni	-0.682	0.746	0.551	0.780	-0.095	0.985	0.376	0.197	-0.351	0.578	-0.718	0.142	0.570	0.925	0.842	1												
Cu	-0.160	0.260	0.209	0.343	-0.094	0.340	0.222	0.041	-0.147	0.187	-0.304	0.088	0.436	0.304	0.531	0.384	1											
Zn	-0.843	0.894	0.703	0.896	0.200	0.916	0.286	0.473	-0.175	0.762	-0.794	0.125	0.762	0.908	0.817	0.883	0.334	1										
Pb	-0.283	0.056	-0.096	0.017	0.745	-0.197	-0.326	0.532	0.563	-0.046	0.207	-0.283	0.110	-0.206	-0.085	-0.240	-0.259	0.076	1									
As	-0.221	0.032	-0.109	-0.027	0.143	0.036	-0.106	0.245	0.193	-0.157	0.134	-0.329	0.057	-0.029	0.172	0.086	0.210	0.105	0.310	1								
Sb	-0.167	0.095	0.104	0.057	0.293	-0.075	-0.269	0.301	0.186	0.073	-0.047	-0.026	0.384	-0.052	0.155	-0.050	0.319	0.087	0.299	0.265	1							
Ba	-0.139	-0.139	-0.355	-0.131	0.702	-0.193	-0.505	0.320	0.404	-0.315	0.363	-0.426	-0.150	-0.289	-0.020	-0.172	-0.088	0.005	0.716	0.291	0.334	1						
Sr	0.689	-0.903	-0.898	-0.834	-0.085	-0.677	-0.404	-0.388	0.220	-0.919	0.884	-0.474	-0.780	-0.809	-0.558	-0.598	-0.178	-0.720	0.098	0.195	0.011	0.335	1					
Zr	-0.743	0.772	0.728	0.685	0.578	0.389	0.028	0.704	0.038	0.774	-0.612	0.191	0.746	0.504	0.442	0.305	0.038	0.638	0.410	0.041	0.301	0.194	-0.685	1				
Hf	-0.569	0.612	0.609	0.542	0.447	0.291	0.072	0.542	-0.030	0.643	-0.499	0.186	0.612	0.402	0.339	0.217	-0.080	0.486	0.324	-0.012	0.167	0.109	-0.554	0.834	1			
Th	0.173	-0.307	-0.409	-0.348	0.663	-0.501	-0.323	0.029	0.651	-0.361	0.468	-0.336	-0.315	-0.544	-0.395	-0.487	-0.328	-0.312	0.664	0.123	0.176	0.619	0.310	0.110	0.110	1		
U	0.121	-0.175	-0.119	-0.259	0.112	-0.199	-0.311	0.011	0.090	-0.166	0.143	-0.145	0.104	-0.207	-0.132	-0.161	0.063	-0.084	0.159	0.125	0.734	0.274	0.219	0.051	0.018	0.227	1	
Σ REY	-0.239	0.060	-0.074	0.024	0.808	-0.243	-0.306	0.436	0.561	0.007	0.178	-0.268	0.090	-0.237	-0.132	-0.288	-0.310	0.028	0.869	0.173	0.270	0.656	-0.008	0.494	0.446	0.806	0.143	1

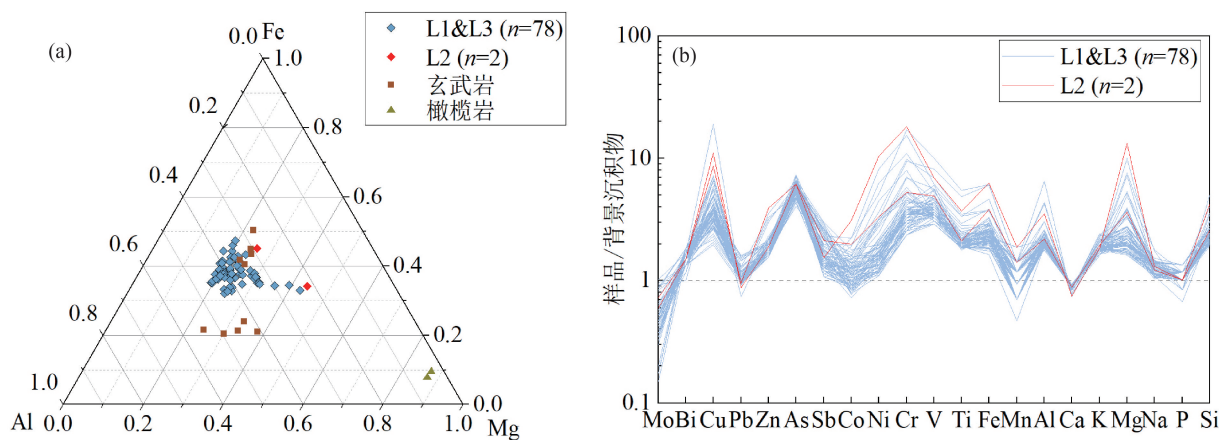


图6 GC03岩心样品组分判别图(玄武岩数据据参考文献[23],橄榄岩数据据参考文献[30])

Fig. 6 Discriminant diagrams of compositions of the core GC03

a—Mg—Fe—Al三元判别图;b—主量和微量元素蛛网图

稀土元素化学性质稳定,对源区具有很大的继承性,常用来示踪沉积物中的物质来源。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图5)显示,稀土元素配分模式相似,表明研究区沉积物具有相近的物质来源和形成过程。通常,火山源物质与生物源相比,HREE轻微富集,Eu几乎无异常,而生物源物质的 ΣREY 含量较低^[11]。GC03岩心沉积物稀土元素配分模式与SWIR钙质沉积物相似(图5),表明沉积物中REY以自生来源为主,显著的负Ce异常则是继承了海水的性质^[16]。研究区稀土元素总量(ΣREY)较低,但相较SWIR钙质沉积物和BGS,具有更高的 ΣREY ,揭示研究区存在更多的非生源物质^[11]。鉴于研究区为大洋中脊的地质背景,且研究区沉积物REY配分曲线相较于SWIR钙质沉积物右倾更平缓,推测洋中脊玄武岩碎屑输入提供了部分REY。

由主量(图3)和微量元素分布特征可知,GC03的L1和L3层物质组成整体稳定,但存在2个突变小层(即L1中的43~51 cmbsf和L3中的203~207 cmbsf)。L1(43~51 cmbsf)和L3(203~207 cmbsf)具有低CaO和高 SiO_2 、MgO等碎屑相关元素含量,而高MSI值(50.2%, 43~51 cmbsf; 42.2%, 203~207 cmbsf)暗示受热液活动影响不明显。高场强元素在风化过程中十分稳定,在海水及生物中含量极低,代表了碎屑源区的化学特征^[4]。L1(43~51 cmbsf)具有高Hf(0.6×10^{-6})和Zr(20.3×10^{-6})特征,均高于钙质沉积物,平均值低于SWIR玄武岩^[4],可能与

较多的玄武岩碎屑输入影响有关。L3(203~207 cmbsf)具有相似的元素分布特征,暗示同样受玄武岩输入影响。

L2具有较低的MSI(38.3%),指示该层位Fe和Mn富集,GC03距离龙旗-1热液区^[8,19]相对较近(图1),可能与龙旗过去的热液活动相关。此外,L2相较于GC03其他层位和BGS更富集Cu、Zn、As、Co、Ni、Fe、Mn等金属元素。Nath等^[31]利用 $(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni})$ 和 Co/Zn 判别热液与水成来源,当 $(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni}) < 2000 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Co}/\text{Zn} < 1$ 时为热液来源。L2中 $(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni})$ 值达到 293.5×10^{-6} ,高于BGS(39.0×10^{-6}),且 Co/Zn 为0.43,表明这些元素富集主要是热液输入造成的。下文对L2中热液来源Fe、Cu和Zn贡献进行了定量评估。

4.2 L2层热液贡献评估

4.2.1 热液来源Fe、Cu和Zn估算

参考Cave等^[6]和Liao等^[13-14]有关沉积物中元素的热液来源贡献计算公式,计算了L2中Fe、Cu和Zn元素的热液贡献量。其中,热液来源Fe含量为0.99%(总Fe=1.92%),Fe的热液贡献为52%;热液来源的Cu含量为 126.9×10^{-6} (总Cu=178 $\times 10^{-6}$),Cu的热液贡献达到了71%;而热液来源的Zn含量为 1.9×10^{-6} (总Zn=41.5 $\times 10^{-6}$),所以Zn的热液贡献为5%。由于较低的热液Zn贡献及GC03所处的水深和构造环境,在GC03附近不太可能存在新的未知热液区,因此,这些热液来源金属很可能来自东侧10 km的龙旗-1热液区。Liao等^[13]通

过对龙角区表层沉积物研究发现,龙旗区热液来源 Zn 较 Cu 通常更早从热液羽状流沉淀中沉降,这与 GC03 中 L2 层的发现一致。值得注意的是,龙旗热液源 Cu 存在于距离龙旗-1 小于 4 km 的热液区^[13],而 L2 层具有较高的热液 Cu 贡献。这可能是之前的研究样品有限或者龙旗不同时期热液活动差异造成的。

L2 层 Mn 含量为 539×10^{-6} ,与龙旗热液区含金属热液沉积物相当^[13](平均 536×10^{-6}),低于 Rainbow 热液区^[6,32](平均 766×10^{-6})。Liao 等^[13]研究认为,龙旗区附近沉积物具有普遍低的 Mn 特征,可能是龙旗非浮力热液羽状流中主要是热液无定形铁氧化相/锰沉降速率较慢引起的。

4.2.2 来自 REY 的证据

L2 的稀土元素分布特征与龙旗、Rainbow 和 Saldanha 热液区附近的含金属热液沉积物相似^[9,13,32]。此外,L2 中 ΣREY 含量略高于 BGS,可能是热液非浮力羽状流中,Fe(Mn) 羟氧化物/氧化物在扩散过程中对海水稀土元素的清扫作用造成的。而 GC03 其他层位较高的 ΣREY 则暗示玄武岩碎屑的贡献增加。

考虑到印度洋中脊沉积物的沉积速率约为 1 cm/ka ^[13,33],L2 记录的热液信息与龙旗较早的一次热液活动时间相近^[34]。Liang 等^[33]通过对龙旗热液产物测年发现,龙旗热液区具有多期次热液活动。然而,GC03 沉积物岩心其他层位并未发现明显的热液输入信号。一方面,热液沉积受热液羽流和底流方向及热液活动强度的影响^[35];另一方面,GC03 离热液区较远,远喷口沉积物热液信号较弱,主量、微量和稀土元素含量低,与正常大洋沉积物相似,有待发展更多的热液指标和进一步的地球化学分析。

4.3 沉积环境

Ce_{anom} 值被作为判断古海水氧化还原条件的常用标志, $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.1$ 表示 Ce 的富集,反映水体呈缺氧环境;而 $\text{Ce}_{\text{anom}} < -0.1$ 则表示 Ce 的负异常,反映水体呈氧化环境^[11]。由表 1 可知,GC03 沉积时水体总体偏氧化。此外,U/Th、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 等元素比值也可用来指示沉积时底层海水的氧化还原状态,通常认为 $\text{U}/\text{Th} < 0.75$ 及 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.46$ 指示氧化环境^[4,36]。通过 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})-\text{U}/\text{Th}$ 判别图(图 7)可知,部分样品显示还原特征,对应的层位为 50~65 cmbsf、87~97 cmbsf、140~170 cmbsf 和 195~202 cmbsf。

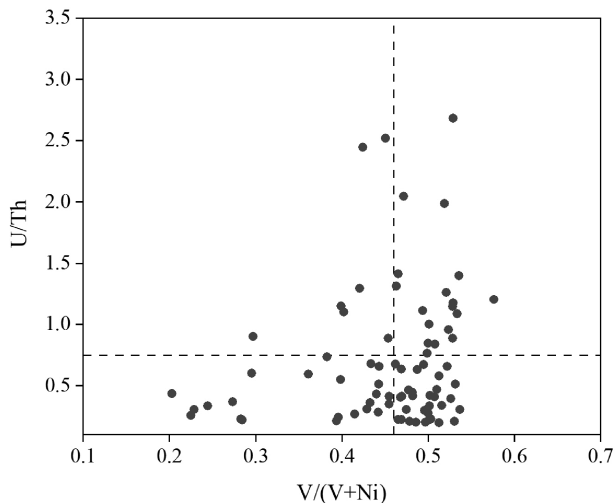


图 7 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})-\text{U}/\text{Th}$ 判别图

Fig. 7 Discrimination plot of $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})-\text{U}/\text{Th}$

5 结 论

(1) 研究区沉积物是钙质沉积,富 Ca、LOI 和 Sr,沉积物物源具有多样性,总体以生物源为主,并混有少量玄武岩或其风化产物碎屑,陆源影响甚微。

(2) 沉积物中 ΣREY 低,轻稀土元素相对富集,Ce 和 Eu 具显著负异常。

(3) 主量、微量和稀土元素及相关比值表明,L2 层受龙旗-1 历史热液活动影响明显,热液源 Fe 和 Cu 贡献较大,主要载体为热液非浮力羽状流中 Fe(Mn) 羟氧化物/氧化物。

(4) Ce_{anom} 值和 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})-\text{U}/\text{Th}$ 判别图表明,研究区总体沉积环境偏氧化,部分层位显示还原特征。

致谢:感谢中国大洋科考第 49 航次全体船员及科考人员对样品采集的辛勤付出和大洋样品馆提供样品,感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- [1] Yu Z, Li H, Li M, et al. Hydrothermal signature in the axial-sediments from the Carlsberg Ridge in the northwest Indian Ocean[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 180: 173-181.
- [2] Agarwal D K, Roy P, Prakash L S, et al. Hydrothermal signatures in sediments from eastern Southwest Indian ridge 63° E to 68° E[J]. Marine Chemistry, 2020, 218: 1-16.
- [3] Mitchell N C. Creep in pelagic sediments and potential for morphologic dating of marine fault scarps[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23

- (5): 483–486.
- [4] 黄大松, 张霄宇, 张国堙, 等. 西南印度洋中脊 48.6°~51.7°E 沉积物地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 22–29.
- [5] Gurvich E G. Metalliferous sediments of the world ocean: Fundamental theory of deep-sea hydrothermal sedimentation [M]. Berlin, New York: Springer, 2006: 80–120.
- [6] Cave R R, German C R, Thomson J. Fluxes to sediments underlying the Rainbow hydrothermal plume at 36°14'N on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(11): 1905–1923.
- [7] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1155–1158.
- [8] Tao C, Lin J, Guo S, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2012, 40(1): 47–50.
- [9] Dias Á S, Barriga F J A S. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted Saldanha hydrothermal field (36°34'N; 33°26'W) at MAR [J]. *Marine Geology*, 2006, 225(1/4): 157–175.
- [10] Dick H J B, Lin J, Hans S. An ultraslow-spreading class of ocean ridge [J]. *Nature*, 2003, 426(6965): 405–412.
- [11] 陈圆圆, 于炳松, 苏新, 等. 西南印度洋中脊钙质沉积物地球化学及矿物学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 107–113.
- [12] 张霄宇, 陶春辉, 廖时理, 等. 西南印度洋洋中脊表层沉积物地球化学特征及其热液活动指示[J]. 沉积学报, 2020, (4): 727–736.
- [13] Liao S, Tao C, Li H, et al. Surface sediment geochemistry and hydrothermal activity indicators in the Dragon Horn area on the Southwest Indian Ridge[J]. *Marine Geology*, 2018, 398: 22–34.
- [14] Liao S, Tao C, Dias Á A, et al. Surface sediment composition and distribution of hydrothermal derived elements at the Duanqiao-1 hydrothermal field, Southwest Indian Ridge [J]. *Marine Geology*, 2019, 416: 1–11.
- [15] 宋备, 苏新, 吕士辉, 等. 西南印度洋中脊活动与非活动热液区沉积物元素地球化学特征对比[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 130–140.
- [16] 刘明, 孙晓霞, 石学法, 等. 印度洋钙质软泥和硅质软泥稀土元素组成和富集机制[J]. 海洋学报, 2019, 41(1): 58–71.
- [17] 林震, 于洪军, 徐兴永, 等. 西南印度洋中脊扩张轴部(34.9°S) 西翼沉积物地球化学分析及物源探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(5): 14–29.
- [18] Georgen J E, Lin J, Dick H J B. Evidence from gravity anomalies for interactions of the Marion and Bouvet hotspots with the Southwest Indian Ridge: Effects of transform offsets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 187(3/4): 283–300.
- [19] Tao C, Seyfried W E, Lowell R P, et al. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1300.
- [20] Chen J, Tao C, Liang J, et al. Newly discovered hydrothermal fields along the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge around 63 E[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(11): 61–67.
- [21] Li H, Tao C, Yue X, et al. Enhanced hydrothermal activity on an ultraslow-spreading supersegment with a seismically detected melting anomaly[J]. *Marine Geology*, 2020, 430: 1–12.
- [22] Kolla V, Bé A W H, Biscaye P E. Calcium carbonate distribution in the surface sediments of the Indian Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(15): 2605–2616.
- [23] 于森, 苏新, 陶春辉, 等. 西南印度洋中脊 49.6°E 和 50.5°E 区玄武岩岩石学及元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 497–508.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 1–312.
- [25] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2963–2980.
- [26] Dymond J. Geochemistry of Nazca plate surface sediments: An evaluation of hydrothermal, biogenic, detrital, and hydrogenous sources[J]. *Geological Society of America*, 1981, 154(154): 133–174.
- [27] Pietrek H. Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean[J]. *Geological Society of America*, 1981, 186: 87.
- [28] McCave I N, Kiefer T, Thornalley D J R, et al. Deep flow in the Madagascar-Mascarene Basin over the last 150, 000 years [J]. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2005, 363(1826): 81–99.
- [29] Kuhn T, Burger H, Castradori D, et al. Volcanic and hydrothermal history of ridge segments near the Rodrigues Triple Junction (Central Indian Ocean) deduced from sediment geochemistry [J]. *Marine Geology*, 2000, 169(3/4): 391–409.
- [30] 韩宗珠, 张贺, 范德江, 等. 西南印度洋中脊 50°E 基性超基性岩石地球化学特征及其成因初探[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(9): 69–76.
- [31] Nath B N, Bau M, Rao B R, et al. Trace and rare earth elemental variation in Arabian Sea sediments through a transect across the oxygen minimum zone[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(12): 2375–2388.
- [32] Chavagnac V, German C R, Milton J A, et al. Sources of REE in sediment cores from the Rainbow vent site (36°14'N, MAR) [J]. *Chemical Geology*, 2005, 216(3/4): 329–352.
- [33] McArthur J M, Elderfield H. Metal accumulation rates in sediments from Mid-Indian Ocean Ridge and Marie Celeste Fracture Zone[J]. *Nature*, 1977, 266(5601): 437–439.
- [34] Liang J, Tao C, Yang W, et al. $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ Dating of Sulfide Chimneys in the Longqi-1 Hydrothermal Field, Southwest Indian Ridge[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 93(S2): 77–78.
- [35] Huang X, Chen S, Zeng Z, et al. The influence of seafloor hydrothermal activity on major and trace elements of the sediments from the South Mid-Atlantic Ridge[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(5): 775–780.
- [36] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.