

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.05.002

# 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

林震<sup>1,2,3</sup>, 于洪军<sup>2</sup>, 徐兴永<sup>4</sup>, 杨继超<sup>2</sup>, 易亮<sup>5</sup>, 付腾飞<sup>4</sup>, 吕文哲<sup>4</sup>

1.中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

2.国家深海基地管理中心, 青岛 266237

3.中国科学院大学, 北京 100049

4.国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

5.同济大学, 上海 200092

**摘要:**西南印度洋中脊沉积物来源广泛, 是区域海洋环境演化的记录器, 对其沉积物特征及物源研究是区域古海洋研究的基础。对采自西南印度洋中脊扩张轴部(34.9°S)西翼的重力柱沉积物样品进行总碳、总有机碳、生物硅、主量元素、微量及稀土元素测试, 测试结果显示, 样品中生物成因组分为沉积物的主要组成, 主要包括碳酸盐和二氧化硅; 主微量元素除了 Ca、Sr 与 LOI 外, 其余元素的分布趋势基本一致, 且相关系数基本大于 0.8。结合不同生物组分特点进行分析计算, 获得了沉积物中各生物组分的含量。去除生物成因组分重新计算了非生物成因元素含量, 通过潜在物源及相应地球化学指标对比分析, 发现非生物成因组分主要由非洲南部风成陆源物质组成, 含少量洋中脊硫化物与结壳物质。

**关键词:**西南印度洋脊; 地球化学; 沉积物物源

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

## Geochemistry and provenance of the sediment from the west flank of the spreading southwest Indian Oceanic Ridge (34.9°S)

LIN Zhen<sup>1,2,3</sup>, YU Hongjun<sup>2</sup>, XU Xingyong<sup>4</sup>, YANG Jichao<sup>2</sup>, YI Liang<sup>5</sup>, FU Tengfei<sup>4</sup>, LV Wenzhe<sup>4</sup>

1. Institute of Deep-sea Science and Engineering, China Academy of Sciences, Sanya 572000, China

2. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China

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

4. The First Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Qingdao 266061, China

5. Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** The multi-origin sediments on the southwest Indian Ridge (SWIR) are the archive of environmental evolution of the region. The study of sediment characteristics and provenances founded the basis of paleoceanographic study. In this paper, we analyzed the deep-sea sediment samples from a gravity core sampled at 34.9°S on the spreading SWIR, and a comprehensive data set was constructed for their bulk chemical compositions, including major elements, trace elements, and bio-components. As the data show, the bulk samples are dominated by bio-components, consisting of high bio-carbonate and low bio-silica. The distribution patterns of major elements are rather accordant. Except for Ca, Sr, and LOI, the correlation coefficient of other major elements are greater than 0.8. Based on the properties of bio-components of sediment, we computed the weight percentage of each bio-component. Removed the bio-components from the bulk, we recalculated the weight percentage of non-biotic elements. The data is used as geochemical proxies to study the potential sources. It is found that the abiotic component of the sediment is mainly terrestrial and local origin. The primary source is the aeolian dust from southern Africa, with a small amount of deposits from hydrothermal sulfide and manganese crust.

**Key words:** southwest Indian Ridge; geochemistry; sediment source

**资助项目:**国家重点基础研究发展计划“超深渊生物群落及其与关键环境要素的相互作用机制研究”(2015CB755901)

**作者简介:**林震(1990—),男,博士研究生,主要从事深海沉积物研究, E-mail: linz@sidsse.an.cn

**收稿日期:**2017-05-05; **改回日期:**2017-06-12. 蔡秋蓉编辑

西南印度洋中脊沉积物主要为碳酸盐沉积,主要来源于表层水浮游有孔虫等碳酸盐生物壳体沉积<sup>[1]</sup>,当水深浅于碳酸盐溶跃层时,西南印度洋中脊沉积物中碳酸盐含量基本达 80% 以上<sup>[2,3]</sup>。黄大松等研究了在西南印度洋中脊部分区域(37.4°~38.1°S, 48.6°~51.7°E)的 14 个表层样品,其  $\text{CaCO}_3$  平均含量为 87%;陈圆圆等指出,西南印度洋中脊 50°S 附近、水深 1585~2327m 处的 9 个表层样品中,细粒组分方解石含量都大于 90%<sup>[3]</sup>。根据 Kolla<sup>[4]</sup>的研究,印度洋不同区域的碳酸盐补偿深度(CCD, carbonate compensation depth)存在差异,从赤道到 60°S 之间,每 10° 分为一个区,而在 30°~40°S 这个区中,CCD 为 4800m,溶跃层为 4400~4450m;Banakar 等对中印度洋盆南北走向剖面(4°N~3°S, 76°E)表层沉积物研究认为,中印度洋盆碳酸盐溶跃层只有 300m 厚的水深,在水深 4400m 以浅  $\text{CaCO}_3 > 60\%$ ,在水深 4700m 以深  $\text{CaCO}_3 < 10\%$ <sup>[5]</sup>。

西南印度洋中脊区域沉积物由于碳酸盐含量较高( $> 50\%$ )<sup>[4,6]</sup>,限制了沉积物非生物组分的研究<sup>[7]</sup>。为了避免生物组分的干扰,酸溶法已被许多国内外学者使用,但该法难免会造成 Fe-Mn 氧化物等部分非生物成因物质的流失<sup>[8]</sup>,最终影响数据的可靠性。另一种方法则是建立数学模型,计算非生物成因组分含量,由于沉积物沉积过程影响因素很

多,导致各沉积组分来源供给不稳定,难以建立有效的定量、半定量沉积物组分分布数学模型。国内外学者已对西南印度洋中脊沉积物做了大量的调查和研究,而对沉积物非生物组分来源的研究仍存在着大量不足。例如 DSDP 第 25、26 航段在西印度洋区域取得的 245、246、247、251、252 站位等钻孔<sup>[9,10]</sup>和英国皇家调查船达尔文号 129 航次<sup>[11,12]</sup>于西印度洋开展取样工作(图 1),此外,国内外对印度洋碳酸盐沉积物开展了许多相关研究<sup>[6]</sup>,但对西南印度洋中脊附近沉积物非生物物源并未进行全面的分析研究。

非碳酸盐物质组成来源复杂,是西南印度洋中脊沉积物来源分析的难点。该区域存在着洋中脊热液硫化物烟囱活动以及大量的洋中脊玄武岩分布<sup>[13-17]</sup>;洋流结构复杂且有季节性变化,底层流水主要来自南极绕极流底层流<sup>[18]</sup>;南印度洋两侧的澳大利亚与非洲南部都存在着大面积的干旱与半干旱气候区域,是全球大洋风尘沉积物的几大重要来源组成<sup>[19]</sup>。Kolla 等<sup>[20]</sup>从大量的黏土矿物特征分析结果可知,研究区黏土矿物属于混合型,无明显的物源指示特征,导致黏土矿物在研究区难以作为物源研究指标,增加了物源分析的难度。黄大松等<sup>[6]</sup>利用 48.6°~51.7°E 西南印度洋脊表层沉积物的主量元素与硅的相关性分布,结合主微量元素物相特征与背景资料,认为沉积物中非碳酸盐组分为洋中脊

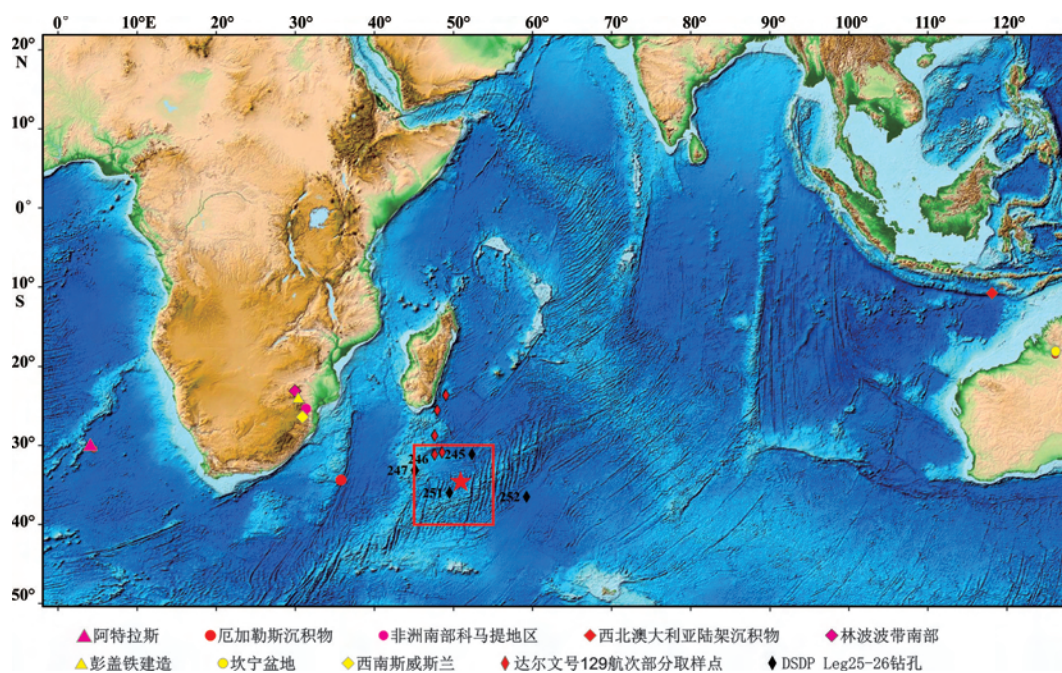


图 1 采样位置及本文引用数据取样位置分布图(根据全球 30 位数据利用 Arcgis 软件作图)

Fig.1 Sampling location and data distribution

玄武岩沉积形成。Li Z 等<sup>[7]</sup>利用 2 个采自 48°E 西南印度洋中脊碳酸盐沉积物样品,经酸洗去除碳酸盐成分后,测试分析主微量元素特征,判断沉积物中非生物成因物质主要为硫化物与澳大利亚风成物质,再根据东太平洋硫化物与碳酸盐混合沉积物组分模型,计算沉积物中硫化物与风成澳大利亚风尘的百分含量。陈圆圆等<sup>[3]</sup>研究(49.8~51.8°E,37.4~37.8°S)西南印度洋脊钙质沉积物,认为沉积物以生物源为主,非生物组分为陆源物质,并混有幔源物质,受热液活动影响不明显。

本研究拟对柱状样沉积物来源进行研究,开展沉积物样品总碳、总有机碳、生物硅、主量元素、微量及稀土元素等组分测试工作,结合沉积物地球化学特征及其潜在物源对其进行物源分析研究,确定沉积物样品的成分组成与沉积来源分布。

## 1 材料与方法

西南印度洋中脊长度约 7000km,是超慢速扩

张洋中脊(全扩张速率 $<12\text{mm/a}$ )<sup>[21]</sup>,分开了非洲板块与南极洲板块。在 35~69°E 区间,西南印度洋中脊被多条断裂切割,这些断裂是洋中脊两侧深层洋流运输的主要通道<sup>[22]</sup>。本研究采样点位于马达加斯加海盆东南坡,东面为马达加斯加隆起,东南面为西南印度洋中脊(图 2)。西南印度洋中脊已发现多处硫化物热液活动区,距离本研究采样点最近的是龙旗热液区<sup>[23]</sup>,位于采样点东南方向约 300km 处。

本研究样品是大洋 35 航次于 2015 年 2 月 15 日采自西南印度洋中脊西侧(距洋中脊轴约 200km)斜坡上的重力柱沉积物样品,采样位置经纬度坐标为:33°59.514'S,50°54.605'E,水深 4430m(图 2)。样品长度 240cm,为土红色软泥,无明显分层,未见有浊流沉积和块体坍塌再沉积结构,多数层位出现肉眼可见有孔虫壳体,其粒径可达 0.5mm 以上。本研究对样品进行 10cm 间距取样进行测试分析,取样厚度为 1cm,共取样 24 个,经冷冻干燥,研磨至 74 $\mu\text{m}$ (200 目筛),再进行主微量与稀土元素、总碳、总有机碳及生物硅测试。

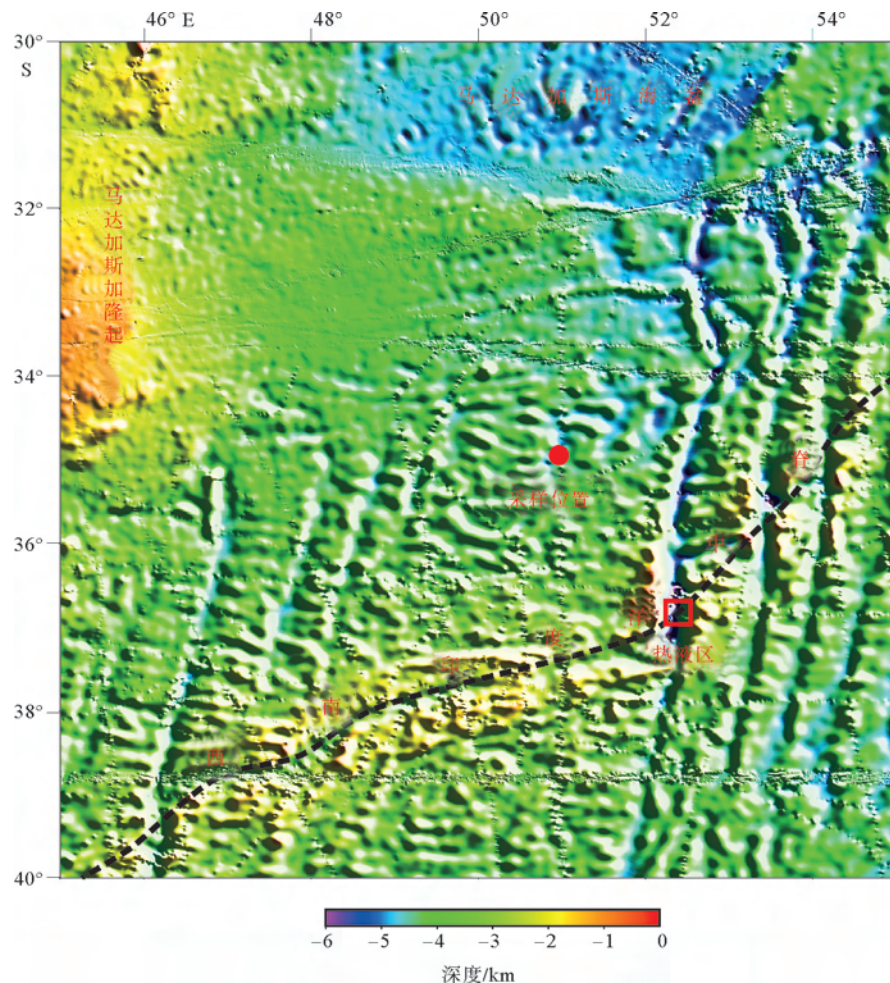


图 2 采样位置图(图中区域为图 1 中红色方框区域)

Fig.2 Map of sampling location (the red rectangle in Fig. 1)

主量元素用荧光光谱仪(XRF)法进行测试分析,设备型号 PANalytical Magix Fast(荷兰);微量与稀土元素用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),设备型号 Perkin Elmer Elan 9000(美国),以上的测试分析实验在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素测量精度是 0.01%,测试内容包括  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{As}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{CoO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{SrO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 。微量元素(与精度)包括  $\text{Cr}(10 \times 10^{-6})$ ;  $\text{V}(5 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Zr}(2 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Sn}$ 、 $\text{W}(1 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Ba}$ 、 $\text{Ce}$ 、 $\text{La}$ 、 $\text{Y}(0.5 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Hf}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Rb}(0.2 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Ga}$ 、 $\text{Nd}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Ta}(0.1 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Dy}$ 、 $\text{Gd}$ 、 $\text{U}(0.05 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Er}$ 、 $\text{Eu}$ 、 $\text{Pr}$ 、 $\text{Sm}$ 、 $\text{Yb}(0.03 \times 10^{-6})$ ;  $\text{Cs}$ 、 $\text{Ho}$ 、 $\text{Lu}$ 、 $\text{Tb}$ 、 $\text{Tm}$ 、 $\text{Th}(0.01 \times 10^{-6})$ 。

无机碳是利用总有机碳(TOC)与总碳(TC)的测试结果进行相减获得的,总有机碳(TOC)、总碳(TC)含量使用德国 Elementar 公司生产的 Vario EL III 型元素分析仪在国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室完成。测试过程中,用乙酰苯胺(ACET)做标样,水系沉积物样品(GSD-9)做质量控制,测试误差 $<0.1\%$ 。

生物成因  $\text{SiO}_2$  测试采用硅钼蓝比色法,用棱光-721 分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)测定,测试工作于国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室完成。测试结果用标准硅溶液(氟硅酸钠  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  配制)测试值校正,测试误差为 $\pm 4.0\%$ 。

## 2 结果

### 2.1 主微量及稀土元素分布

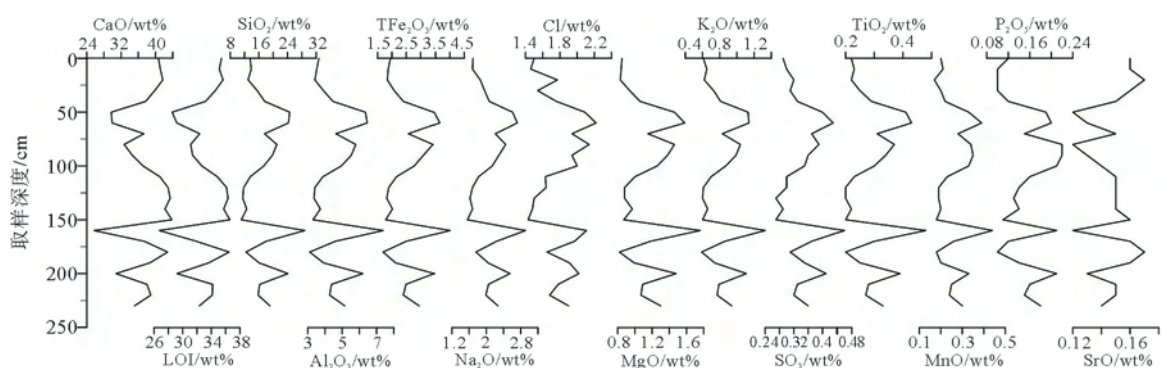


图 3 主量元素含量随取样深度的分布曲线

Fig.3 Major elements abundance in the core

主量元素测试结果显示(表 1),含量 $>0.1\%$ 的主量元素由高到低依次是  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ ,含量值 $\leq 0.1\%$ 有  $\text{SrO}$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{As}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CoO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ ,为微量元素。样品烧失量(LOI, loss on ignition)平均值为 33.22%,其主要成分为样品加热分解的气态产物(如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等)和有机质。从沉积物主量元素深度分布曲线(图 3)可以看出几乎所有的主量元素具有一致的变化规律,只有  $\text{CaO}$  和 LOI 与其他主量元素分布趋势相反。

微量元素测试结果(表 2)显示  $\text{Cr}$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Ta}$ 、 $\text{W}$  4 种元素因测试值与测试误差较为接近,数据可信度低,因此舍弃。其中  $\text{Sr}$  与其他微量及稀土元素分布趋势相反,其余的微量元素含量与稀土元素随着深度的变化趋势和频率基本一致(图 4)。

根据测试结果分布曲线,几乎所有成分表现出一致的分布变化频率,其中  $\text{CaO}$ 、LOI 及  $\text{Sr}$  变化一致且与其余元素反相分布。可以看出这些变化规律一致元素具有稳定的物质来源,沉积物特征变化受同样的因素影响。虽然物源供给量或沉积速率发生变化,但其物源组分结构长期稳定。因此认为,即使本研究柱状样品是长时间沉积形成,其沉积物也可以代表该区域沉积物来源。

在海洋沉积物中, $\text{Ti}$  与  $\text{Al}$  常被作为陆源碎屑指示元素,并且被用于陆源物质的估算,而  $\text{Al}$  常出现在生物成因的  $\text{Al}$  过剩,因此,本文使用  $\text{Ti}$  来指示陆源物质<sup>[24]</sup>。主量元素与  $\text{Ti}$  基本呈线性分布(图 5),说明各主成分与  $\text{Ti}$  比值稳定;从  $R^2$  值(图 5)可以看出以上列出的主量元素与  $\text{Ti}$  的曲线拟合度很高,因此认为,沉积物受陆源物质作用主导。

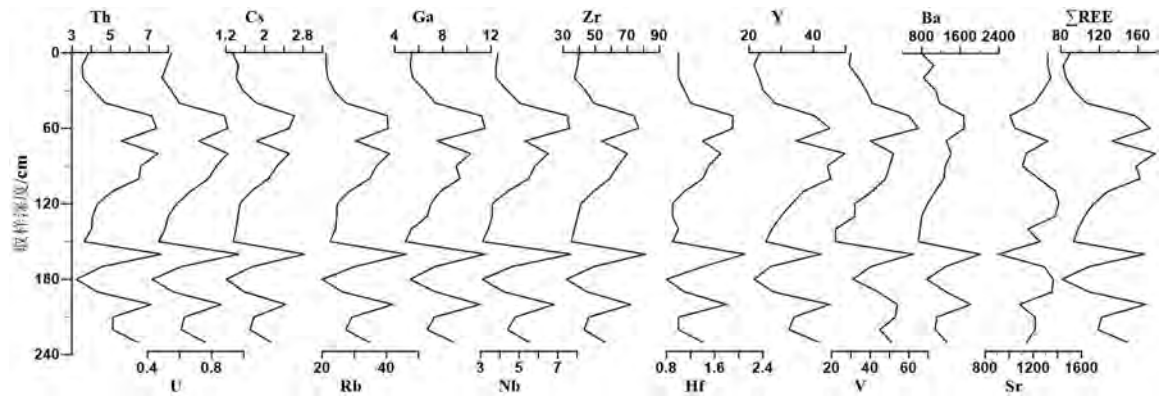


图 4 微量与稀土元素总量( $\times 10^{-6}$ )随取样深度变化分布曲线  
Fig.4 Trace elements abundance( $\times 10^{-6}$ ) in the core

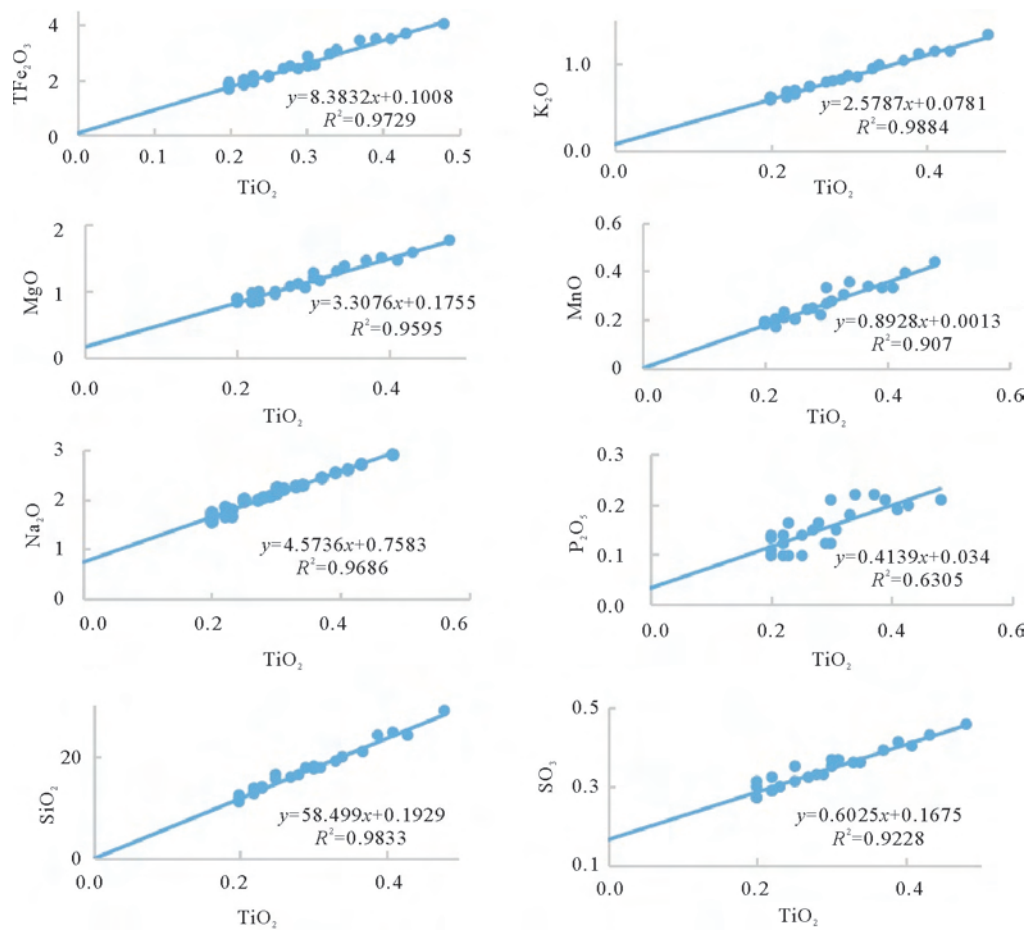


图 5 主量元素/ $\text{TiO}_2$  分布散点图  
Fig.5 Correlation of major elements vs.  $\text{TiO}_2$

2.2 元素组分特征统计分析

不同层位的沉积物元素组成具有基本一致变化趋势等特征,说明样品的物源供给较为稳定,其数据统计特征可代表物源特征。

利用 SPSS 软件对样品测试数据进行相关性分

析和系统聚类,其相关系数分布如表 3 所示,聚类结果如图 6 所示。其中  $\text{CaO}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{LOI}$  成正相关,相关系数都大于 0.8,且与其余元素呈负相关,而其余元素之间都为正相关。利用元素相关性进行聚类分析(结果如图 6),将主微量元素及稀土分为以下 5 组:

I :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Rb}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Zr}$ 、

Cs、Hf、Ga、U、Na<sub>2</sub>O、Cl、SiO<sub>2</sub>、Ba、V、Th、 $\Sigma$ REE、TiO<sub>2</sub>、Y;

II:SO<sub>3</sub>;

III:MnO;

IV:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

V:LOI、CaO、Sr

I 组中元素成分最多,基本上代表样品中多数

主微量及稀土元素来源。其中 $\Sigma$ REE 与组内其余元素相关系数都大于 0.8,平均值为 0.9,因此,可利用 REE 的特征分析判断该组分的物质来源。

II、III 与 IV 组的组分比较单一,有可能受单一的物质来源或地质作用控制。

V 组分是本研究样品的主要组成,其总量平均值超过 70%,其物质来源代表本研究主要物源。

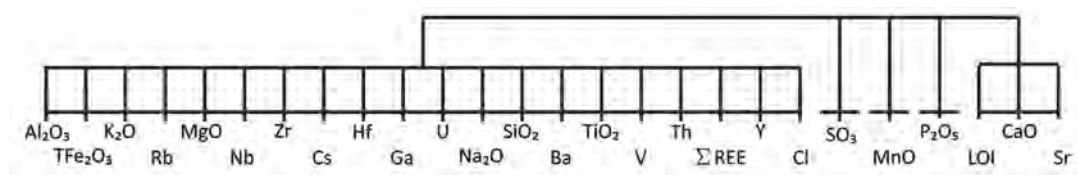


图 6 样品化学成分聚类结果分布

Fig.6 The cluster of chemical composition of samples

## 2.3 生物组分的计算与结果

沉积物样品中生物组分主要有碳酸盐、生物成因 SiO<sub>2</sub> 与含磷生物沉积。

深海沉积物中生物成因碳酸盐主要为碳酸钙,碳酸钙晶体主要有两种:菱形晶系的方解石和斜方晶系的霏石。其中霏石较不稳定,很少能在沉积物中长期保存<sup>[19]</sup>;方解石中可能含有高镁方解石(碳酸镁含量可达 4% 以上),但在深海的环境下较为罕见<sup>[25]</sup>。本研究样品 Mg 与碳酸盐主要组成的 CaO、Sr、LOI 的相关系数分别为 -0.95、-0.87、-0.95,且其分布趋势相反,说明样品中来自生物成因碳酸盐高镁方解石的 Mg 含量很小,因此,本研究生物成因碳酸盐计算忽略 MgCO<sub>3</sub>。

由于 Sr 与 Ca 常以类质同象出现在碳酸盐岩矿物(方解石)晶体中,在富含碳酸盐矿物中富集<sup>[26]</sup>,因此,本研究使用 Li Z 等<sup>[7]</sup>在西南印度洋中脊(38°S,48°E)取的表层碳酸盐沉积物经过酸溶法(去除生物成因碳酸盐)获得的生物成因 Sr 约为样品中 Sr 总量的 80.3%,作为样品中 Sr 元素的生物成因含量比例。本文生物成因碳酸盐计算使用无机碳物质的量近似代表生物成因碳酸盐物质的量,即为生物成因 Ca 与 Sr 物质的量之和,Sr 的物质的量根据上述方法获得,Ca 根据无机碳总量减去生物成因 Sr 的量计算获得。根据有机碳与总碳测试结果,计算样品中生物成因碳酸盐含量。样品的碳酸盐平均含量为 62.30%,取值范围为 43.35%~73.63%,其分布如图 7 所示。

根据生物硅测试结果分析,其分布变化如图 7 所示。沉积物中的硅含量平均值为 7.96%,生物硅为 0.95%(bio-SiO<sub>2</sub> 为 2.08%),生物硅含量为沉积物中硅总量的 11.94%,说明沉积物的硅主要来源不是生物成因,而是来自其他物源的供给。

根据 Filippelli 等<sup>[27]</sup>对太平洋赤道区沉积物中磷的沉积地球化学研究结果,沉积物中自生磷、铁膜包裹磷(iron-bound)、有机磷、吸附磷以及碎屑磷的含量分别占总磷的 61%~86%、7%~17%、3%~12%、2%~9%与 0~1%。其中只有有机磷可能来源于生物成因,取最大值 12%,结果约为 0.018%。沉积物中生物成因碳酸盐中磷的平均含量约为  $(300 \pm 80) \times 10^{-6}$ ,对于孔虫壳体其值更低( $<60 \times 10^{-6}$ )而对细粒超微化石则更高( $380 \times 10^{-6}$ )<sup>[28]</sup>。取平均值  $300 \times 10^{-6}$ ,结果为 0.019%,与前一种方法所计算的总有机磷的比例接近,但从样品中出现大量的有孔虫壳体说明碳酸盐中的磷的值明显小于这个值。由于样品中磷含量相对碳酸盐总量约为 1/400 (0.15%/63.1%),说明生物成因磷的含量值对总样品生物组分与非生物组分影响很小。因此,取有机磷含量的最大值代表生物成因磷,为样品总磷的 12%。利用主量元素 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的测试结果计算沉积物样品中生物成因磷的含量,其平均含量为 0.018%,取值范围为 0.012%~0.026%,其分布如图 7 所示,从含量值可以看出生物成因磷对沉积物总量影响是微弱的。

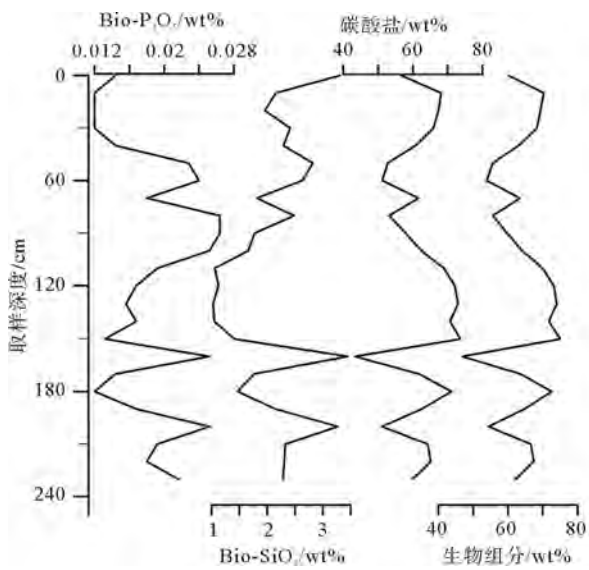


图7 生物沉积组分变化分布图

Fig.7 Bio-components in the core

### 3 讨论

根据沉积物来源,本研究将样品分为生物成因与非生物物质来源两类,其中生物成因沉积物是样品的主要组成,来源比较单一,非生物组分占的比重比较小,其物质来源比较复杂,是本研究主要讨论部分。

#### 3.1 生物沉积

深海生物沉积主要由钙质软泥(碳酸盐)和硅质(二氧化硅)软泥两种类型组成<sup>[19,28]</sup>,根据研究区的沉积物分布特征<sup>[3,4,29]</sup>及样品测试结果计算,样品中生物成因组分总量均值约为 64.4%。其中含量最高的是碳酸盐,主要源自有孔虫等浮游生物碳酸盐壳体沉积形成。研究区底层水为由南向北运动的南极底层水<sup>[18,30,31]</sup>,南大洋底层水富生物硅颗粒。研

究区处于西南印度洋中脊北坡,西南印度洋中脊南侧的克洛泽海盆南极底层水向北运输主要是通过西南印度洋中脊的深断裂带流向马达加斯海盆<sup>[22]</sup>。北向运动的南极底层水通过洋中脊断裂进入开阔的马达加斯海盆<sup>[22]</sup>,具有与三角洲相似的卸载作用,发生沉积作用,因此认为,研究区生物成因硅(蛋白石)沉积与南极底层水有关。

#### 3.2 非生物碎屑物质

根据样品主微量元素测试结果,减去生物成因组分,重新计算非生物沉积物组分的百分含量。根据非生物组分地球化学特征,利用地球化学指标对比分析非生物组分来源。

##### 3.2.1 非生物物质来源组成

上陆壳元素平均值常作为深海沉积物陆源特征分析指标<sup>[7]</sup>,利用主微量元素与上陆壳(UCC, upper continental crust)主量元素平均值的比值分析<sup>[32]</sup>,由图 8 可以看出沉积物中主量元素 Si、Al、K、Fe、Ca、Na、Mg、Ti 的含量与 UCC 较为接近,呈弱贫 Si、Al、K,弱富 Fe、Ca、Na、Mg、Ti,明显富 P、Mn、S 元素。

深海沉积物(非生物成因)中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 CaO 的两大主要来源是陆源碎屑和洋中脊火山产物<sup>[33]</sup>。根据主量元素与 UCC 比值可以看出样品与 UCC 主量元素特征具有一定的相似性;而从 P、Mn、S 与 UCC 比值可以看出样品物质来源存在与 UCC 明显不同的成分组成,说明样品主要物质成分由陆源物质和其他来源物质多源组成。结合聚类分析结果,认为 Mn、S 可能来源于 Mn 结核结壳、硫化物等洋中脊的物质。图 8 中 Ca 含量波动变化,可能是由于碳酸盐溶跃层环境变化,造成碳酸钙溶解率不稳定,或是碳酸盐沉积物输入量的变化,导致非碳酸盐含钙沉积物沉积速率波动变化<sup>[34]</sup>。比如:气

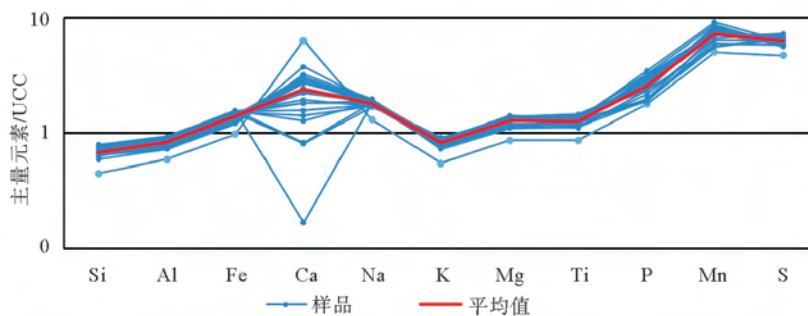


图8 非生物组分主量元素与上陆壳(UCC)比值(据文献[32])

Fig.8 Comparisons of major element compositions between the abiotic components and UCC

表 1 主量元素数据(%)

Table 1 Data of major elements

| 取样层位/cm | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | BaO  | CaO  | Cl   | TF <sub>e2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO  | MnO  | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | SrO  | TiO <sub>2</sub> | LOI   |
|---------|--------------------------------|------|------|------|---------------------------------|------------------|------|------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|------|------------------|-------|
| 0~10    | 3.64                           | 0.08 | 40.7 | 1.50 | 1.95                            | 0.61             | 0.85 | 0.20 | 1.69              | 0.12                          | 13.55            | 0.29            | 0.16 | 0.22             | 35.42 |
| 10~20   | 3.52                           | 0.12 | 41.1 | 1.46 | 1.87                            | 0.65             | 0.84 | 0.21 | 1.68              | 0.10                          | 13.88            | 0.30            | 0.16 | 0.23             | 35.12 |
| 20~30   | 3.41                           | 0.09 | 41.7 | 1.77 | 1.84                            | 0.62             | 0.83 | 0.17 | 1.86              | 0.10                          | 12.99            | 0.32            | 0.17 | 0.22             | 35.64 |
| 30~40   | 3.91                           | 0.12 | 39.8 | 1.54 | 2.08                            | 0.73             | 0.94 | 0.20 | 1.96              | 0.10                          | 15.56            | 0.31            | 0.16 | 0.25             | 34.54 |
| 40~50   | 4.46                           | 0.13 | 37.7 | 1.76 | 2.40                            | 0.81             | 1.06 | 0.22 | 2.07              | 0.12                          | 17.64            | 0.33            | 0.15 | 0.29             | 33.19 |
| 50~60   | 6.35                           | 0.19 | 29.7 | 2.09 | 3.45                            | 1.13             | 1.46 | 0.33 | 2.61              | 0.19                          | 24.61            | 0.40            | 0.12 | 0.41             | 28.52 |
| 60~70   | 6.46                           | 0.20 | 29.9 | 2.22 | 3.65                            | 1.14             | 1.58 | 0.39 | 2.72              | 0.20                          | 24.25            | 0.43            | 0.13 | 0.43             | 29.18 |
| 70~80   | 4.63                           | 0.15 | 37.3 | 1.94 | 2.57                            | 0.83             | 1.15 | 0.28 | 2.21              | 0.15                          | 17.58            | 0.37            | 0.15 | 0.31             | 32.37 |
| 80~90   | 5.79                           | 0.15 | 32.7 | 2.14 | 3.43                            | 1.04             | 1.46 | 0.34 | 2.45              | 0.22                          | 21.03            | 0.39            | 0.12 | 0.37             | 31.12 |
| 90~100  | 5.53                           | 0.15 | 34.6 | 1.94 | 3.10                            | 0.99             | 1.38 | 0.35 | 2.29              | 0.22                          | 19.79            | 0.36            | 0.13 | 0.34             | 31.39 |
| 100~110 | 4.95                           | 0.13 | 37.1 | 2.00 | 2.78                            | 0.87             | 1.26 | 0.33 | 2.14              | 0.21                          | 17.37            | 0.35            | 0.14 | 0.30             | 32.67 |
| 110~120 | 3.88                           | 0.11 | 41.0 | 1.63 | 2.16                            | 0.70             | 1.00 | 0.23 | 1.82              | 0.16                          | 13.61            | 0.30            | 0.15 | 0.23             | 34.84 |
| 120~130 | 3.41                           | 0.09 | 42.9 | 1.64 | 1.89                            | 0.61             | 0.88 | 0.19 | 1.68              | 0.14                          | 11.78            | 0.30            | 0.15 | 0.20             | 36.12 |
| 130~140 | 3.36                           | 0.08 | 43.4 | 1.50 | 1.82                            | 0.60             | 0.88 | 0.19 | 1.62              | 0.13                          | 11.51            | 0.27            | 0.15 | 0.20             | 36.34 |
| 140~150 | 3.73                           | 0.09 | 42.2 | 1.48 | 2.02                            | 0.66             | 0.97 | 0.20 | 1.68              | 0.14                          | 12.61            | 0.29            | 0.15 | 0.22             | 35.73 |
| 150~160 | 3.30                           | 0.08 | 43.8 | 1.43 | 1.78                            | 0.60             | 0.87 | 0.18 | 1.56              | 0.11                          | 11.08            | 0.27            | 0.16 | 0.20             | 36.59 |
| 160~170 | 7.39                           | 0.25 | 25.7 | 2.11 | 4.01                            | 1.33             | 1.76 | 0.44 | 2.91              | 0.21                          | 28.84            | 0.46            | 0.12 | 0.48             | 26.73 |
| 170~180 | 4.60                           | 0.15 | 37.4 | 1.97 | 2.50                            | 0.86             | 1.18 | 0.26 | 2.24              | 0.12                          | 18.06            | 0.37            | 0.16 | 0.30             | 31.91 |
| 180~190 | 3.11                           | 0.10 | 42.8 | 1.65 | 1.69                            | 0.59             | 0.82 | 0.18 | 1.76              | 0.10                          | 12.40            | 0.31            | 0.17 | 0.20             | 36.48 |
| 190~200 | 3.91                           | 0.14 | 38.7 | 1.91 | 2.13                            | 0.74             | 0.99 | 0.20 | 2.04              | 0.14                          | 16.04            | 0.35            | 0.16 | 0.25             | 33.64 |
| 200~210 | 6.21                           | 0.20 | 30.8 | 2.02 | 3.47                            | 1.11             | 1.48 | 0.33 | 2.55              | 0.21                          | 24.13            | 0.41            | 0.13 | 0.39             | 29.20 |
| 210~220 | 4.38                           | 0.12 | 38.0 | 1.78 | 2.49                            | 0.79             | 1.09 | 0.25 | 2.05              | 0.16                          | 16.23            | 0.33            | 0.15 | 0.28             | 34.18 |
| 220~230 | 4.27                           | 0.11 | 38.9 | 1.68 | 2.40                            | 0.77             | 1.07 | 0.24 | 1.99              | 0.15                          | 15.79            | 0.32            | 0.15 | 0.27             | 34.13 |
| 230~240 | 5.15                           | 0.14 | 35.1 | 1.90 | 2.95                            | 0.94             | 1.30 | 0.30 | 2.27              | 0.18                          | 19.11            | 0.36            | 0.14 | 0.33             | 32.31 |

表 2 微量元素(包括稀土元素)数据( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 Data of rare elements (including rare earth elements)

| 取样层位/cm | Ba   | Zr | Nb  | Rb   | Sr   | Th   | U    | V  | Y    | Cs   | Ga   | Hf  | La   | Ce   | Pr   | Nd   | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   |
|---------|------|----|-----|------|------|------|------|----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0~10    | 785  | 40 | 3.9 | 21.2 | 1320 | 3.86 | 0.55 | 30 | 23.3 | 1.34 | 5.4  | 1.0 | 17.5 | 30.6 | 4.47 | 18.3 | 3.92 | 0.99 | 3.95 | 0.66 | 3.80 | 0.79 | 2.19 | 0.32 | 2.01 | 0.30 |
| 10~20   | 1045 | 39 | 3.8 | 21.2 | 1320 | 3.53 | 0.52 | 29 | 21.5 | 1.46 | 5.3  | 1.0 | 16.7 | 27.1 | 4.17 | 17.1 | 3.67 | 0.92 | 3.84 | 0.56 | 3.49 | 0.72 | 1.98 | 0.29 | 1.82 | 0.27 |
| 20~30   | 839  | 37 | 3.8 | 21.7 | 1345 | 3.58 | 0.49 | 34 | 23.2 | 1.41 | 5.5  | 1.0 | 17.4 | 28.0 | 4.33 | 17.2 | 3.96 | 0.97 | 3.93 | 0.59 | 3.71 | 0.76 | 2.05 | 0.29 | 1.82 | 0.28 |
| 30~40   | 1090 | 44 | 4.4 | 23.7 | 1280 | 4.13 | 0.55 | 38 | 24.4 | 1.55 | 6.5  | 1.1 | 18.6 | 30.8 | 4.86 | 19.3 | 4.24 | 1.06 | 4.39 | 0.65 | 3.96 | 0.82 | 2.25 | 0.32 | 1.94 | 0.29 |
| 40~50   | 1165 | 49 | 5.0 | 27.5 | 1205 | 4.74 | 0.60 | 41 | 28.0 | 1.84 | 7.4  | 1.2 | 21.4 | 35.6 | 5.47 | 22.0 | 4.61 | 1.17 | 5.03 | 0.76 | 4.53 | 0.91 | 2.44 | 0.36 | 2.23 | 0.34 |
| 50~60   | 1670 | 74 | 7.5 | 40.3 | 1005 | 7.14 | 0.88 | 60 | 40.4 | 2.62 | 11.2 | 1.9 | 30.1 | 53.2 | 8.04 | 32.0 | 7.22 | 1.82 | 7.36 | 1.09 | 6.71 | 1.41 | 3.84 | 0.53 | 3.28 | 0.50 |
| 60~70   | 1680 | 77 | 7.6 | 40.5 | 1050 | 7.39 | 0.90 | 65 | 45.1 | 2.51 | 11.5 | 1.9 | 33.5 | 59.3 | 8.84 | 34.6 | 7.79 | 1.96 | 7.78 | 1.23 | 7.39 | 1.48 | 3.98 | 0.59 | 3.49 | 0.52 |
| 70~80   | 1305 | 54 | 5.3 | 30.5 | 1320 | 5.57 | 0.72 | 40 | 34.6 | 1.83 | 7.5  | 1.4 | 26.6 | 45.9 | 6.70 | 27.0 | 5.52 | 1.45 | 5.89 | 0.85 | 5.27 | 1.07 | 3.02 | 0.42 | 2.61 | 0.38 |
| 80~90   | 1410 | 70 | 6.5 | 40.9 | 1140 | 7.46 | 0.90 | 52 | 49.8 | 2.51 | 10.3 | 1.7 | 35.5 | 59.6 | 9.00 | 36.0 | 7.75 | 2.05 | 8.20 | 1.16 | 7.57 | 1.52 | 4.35 | 0.64 | 3.78 | 0.56 |
| 90~100  | 1285 | 64 | 5.8 | 36.9 | 1110 | 6.57 | 0.83 | 50 | 44.3 | 2.26 | 9.1  | 1.5 | 32.0 | 51.6 | 8.07 | 32.9 | 6.71 | 1.82 | 7.46 | 1.04 | 7.16 | 1.32 | 3.82 | 0.53 | 3.26 | 0.49 |
| 100~110 | 1260 | 59 | 5.5 | 34.7 | 1245 | 6.48 | 0.78 | 48 | 45.4 | 2.08 | 9.4  | 1.4 | 33.7 | 52.4 | 8.31 | 33.4 | 6.88 | 1.90 | 7.55 | 1.07 | 7.19 | 1.38 | 3.79 | 0.58 | 3.44 | 0.51 |
| 110~120 | 1080 | 49 | 4.4 | 28.5 | 1385 | 5.10 | 0.67 | 41 | 36.9 | 1.72 | 7.8  | 1.1 | 26.8 | 41.9 | 6.58 | 26.8 | 5.34 | 1.42 | 5.98 | 0.84 | 5.64 | 1.15 | 3.15 | 0.44 | 2.61 | 0.39 |
| 120~130 | 916  | 41 | 3.6 | 24.6 | 1410 | 4.32 | 0.58 | 32 | 33.2 | 1.49 | 7.0  | 0.9 | 23.8 | 36.1 | 5.97 | 24.0 | 4.70 | 1.23 | 5.25 | 0.79 | 4.96 | 0.98 | 2.72 | 0.39 | 2.41 | 0.35 |
| 130~140 | 795  | 39 | 3.6 | 24.5 | 1380 | 4.06 | 0.53 | 32 | 29.9 | 1.45 | 6.7  | 0.9 | 21.9 | 34.1 | 5.40 | 21.6 | 4.28 | 1.12 | 4.87 | 0.68 | 4.51 | 0.90 | 2.41 | 0.35 | 2.10 | 0.30 |
| 140~150 | 766  | 37 | 3.4 | 24.1 | 1155 | 4.02 | 0.51 | 22 | 27.1 | 1.41 | 5.4  | 1.0 | 19.9 | 31.5 | 5.03 | 20.3 | 4.36 | 1.08 | 4.64 | 0.70 | 4.18 | 0.88 | 2.38 | 0.35 | 2.25 | 0.33 |
| 150~160 | 726  | 35 | 3.1 | 22.4 | 1255 | 3.63 | 0.47 | 22 | 25.2 | 1.35 | 4.9  | 0.9 | 19.4 | 29.7 | 4.81 | 19.5 | 3.92 | 1.04 | 4.46 | 0.66 | 3.91 | 0.81 | 2.26 | 0.32 | 1.99 | 0.30 |
| 160~170 | 2010 | 81 | 7.7 | 46.1 | 909  | 7.65 | 0.97 | 62 | 42.2 | 2.83 | 11.5 | 2.1 | 32.5 | 58.7 | 8.22 | 33.6 | 6.89 | 1.77 | 7.59 | 1.12 | 6.87 | 1.35 | 3.72 | 0.54 | 3.27 | 0.48 |
| 170~180 | 1285 | 49 | 4.6 | 29.9 | 1290 | 4.54 | 0.61 | 40 | 26.5 | 1.74 | 7.3  | 1.4 | 22.7 | 36.1 | 5.52 | 22.7 | 4.78 | 1.22 | 4.65 | 0.73 | 4.25 | 0.88 | 2.40 | 0.34 | 2.11 | 0.32 |
| 180~190 | 904  | 32 | 3.1 | 20.0 | 1365 | 3.23 | 0.43 | 31 | 21.7 | 1.21 | 5.3  | 0.8 | 17.6 | 25.3 | 4.26 | 16.9 | 3.75 | 0.86 | 3.73 | 0.55 | 3.37 | 0.71 | 1.91 | 0.28 | 1.71 | 0.26 |
| 190~200 | 1305 | 45 | 4.2 | 26.2 | 1355 | 4.31 | 0.56 | 44 | 27.5 | 1.58 | 7.4  | 1.1 | 22.5 | 35.2 | 5.71 | 23.4 | 5.00 | 1.20 | 5.03 | 0.74 | 4.47 | 0.88 | 2.36 | 0.34 | 2.10 | 0.32 |
| 200~210 | 1810 | 72 | 6.8 | 42.0 | 1085 | 7.09 | 0.86 | 54 | 45.0 | 2.44 | 11.1 | 1.8 | 33.8 | 56.8 | 8.67 | 34.3 | 7.70 | 1.87 | 7.66 | 1.20 | 6.93 | 1.43 | 3.86 | 0.54 | 3.24 | 0.49 |
| 210~220 | 1110 | 46 | 4.8 | 29.3 | 1215 | 5.12 | 0.63 | 53 | 33.9 | 1.78 | 7.3  | 1.0 | 24.8 | 40.0 | 6.15 | 25.3 | 5.54 | 1.42 | 5.48 | 0.82 | 5.19 | 1.09 | 3.07 | 0.44 | 2.65 | 0.41 |
| 220~230 | 1075 | 43 | 4.4 | 27.3 | 1215 | 5.11 | 0.61 | 45 | 32.4 | 1.70 | 6.7  | 1.0 | 23.8 | 38.4 | 5.98 | 25.0 | 5.65 | 1.27 | 5.48 | 0.78 | 4.93 | 1.00 | 2.94 | 0.41 | 2.56 | 0.37 |
| 230~240 | 1320 | 56 | 5.5 | 34.6 | 1145 | 6.40 | 0.76 | 51 | 41.7 | 2.13 | 8.9  | 1.4 | 29.4 | 47.9 | 7.65 | 31.6 | 6.88 | 1.68 | 7.21 | 0.99 | 6.18 | 1.26 | 3.69 | 0.55 | 3.21 | 0.48 |

表 3 主微量及稀土元素相关系数分布

Table 3 The correlated coefficient of major and trace elements

|                                 | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cl    | TF <sub>e2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO   | MnO   | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | LOI   | Ba    | Cs    | Ga    | Hf    | Nb    | Rb    | Sr    | Th   | U    | V    | Y    | Zr   | ΣrE  |
|---------------------------------|-------|--------------------------------|-------|---------------------------------|------------------|-------|-------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| CaO                             | 1.00  |                                |       |                                 |                  |       |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -0.99 | 1.00                           |       |                                 |                  |       |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Cl                              | -0.87 | 0.86                           | 1.00  |                                 |                  |       |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| TF <sub>e2</sub> O <sub>3</sub> | -0.98 | 0.99                           | 0.86  | 1.00                            |                  |       |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| K <sub>2</sub> O                | -0.97 | 0.99                           | 0.86  | 0.98                            | 1.00             |       |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| MgO                             | -0.95 | 0.98                           | 0.87  | 0.99                            | 0.99             | 1.00  |       |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| MnO                             | -0.84 | 0.87                           | 0.79  | 0.88                            | 0.87             | 0.89  | 1.00  |                   |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Na <sub>2</sub> O               | -0.98 | 0.97                           | 0.90  | 0.96                            | 0.96             | 0.94  | 0.85  | 1.00              |                               |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | -0.70 | 0.74                           | 0.66  | 0.79                            | 0.73             | 0.77  | 0.65  | 0.69              | 1.00                          |                  |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| SiO <sub>2</sub>                | -1.00 | 0.98                           | 0.86  | 0.97                            | 0.97             | 0.95  | 0.84  | 0.99              | 0.67                          | 1.00             |                 |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| SO <sub>3</sub>                 | -0.85 | 0.85                           | 0.84  | 0.84                            | 0.85             | 0.87  | 0.87  | 0.86              | 0.58                          | 0.85             | 1.00            |                  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| TiO <sub>2</sub>                | -0.96 | 0.96                           | 0.85  | 0.96                            | 0.96             | 0.96  | 0.80  | 0.94              | 0.72                          | 0.95             | 0.79            | 1.00             |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| LOI                             | 0.99  | -0.98                          | -0.88 | -0.96                           | -0.98            | -0.95 | -0.86 | -0.98             | -0.68                         | -0.99            | -0.88           | -0.94            | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Ba                              | -0.96 | 0.94                           | 0.86  | 0.93                            | 0.93             | 0.91  | 0.79  | 0.96              | 0.67                          | 0.97             | 0.87            | 0.91             | -0.97 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Cs                              | -0.96 | 0.98                           | 0.85  | 0.98                            | 0.96             | 0.97  | 0.85  | 0.94              | 0.78                          | 0.95             | 0.82            | 0.94             | -0.95 | 0.92  | 1.00  |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Ga                              | -0.93 | 0.95                           | 0.87  | 0.95                            | 0.93             | 0.95  | 0.82  | 0.91              | 0.76                          | 0.92             | 0.81            | 0.89             | -0.93 | 0.92  | 0.96  | 1.00  |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Hf                              | -0.97 | 0.98                           | 0.87  | 0.97                            | 0.96             | 0.96  | 0.88  | 0.96              | 0.67                          | 0.97             | 0.88            | 0.93             | -0.98 | 0.94  | 0.96  | 0.93  | 1.00  |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Nb                              | -0.98 | 0.98                           | 0.87  | 0.98                            | 0.95             | 0.95  | 0.84  | 0.96              | 0.76                          | 0.97             | 0.81            | 0.94             | -0.97 | 0.94  | 0.98  | 0.96  | 0.97  | 1.00  |       |       |      |      |      |      |      |      |
| Rb                              | -0.95 | 0.98                           | 0.86  | 0.98                            | 0.97             | 0.99  | 0.86  | 0.93              | 0.80                          | 0.94             | 0.85            | 0.94             | -0.94 | 0.92  | 0.98  | 0.97  | 0.95  | 0.96  | 1.00  |       |      |      |      |      |      |      |
| Sr                              | 0.88  | -0.90                          | -0.64 | -0.88                           | -0.89            | -0.87 | -0.74 | -0.84             | -0.60                         | -0.87            | -0.66           | -0.87            | 0.85  | -0.76 | -0.86 | -0.76 | -0.84 | -0.84 | -0.83 | 1.00  |      |      |      |      |      |      |
| Th                              | -0.92 | 0.95                           | 0.84  | 0.97                            | 0.93             | 0.96  | 0.84  | 0.89              | 0.86                          | 0.89             | 0.80            | 0.90             | -0.90 | 0.87  | 0.97  | 0.96  | 0.92  | 0.95  | 0.98  | -0.80 | 1.00 |      |      |      |      |      |
| U                               | -0.93 | 0.95                           | 0.81  | 0.96                            | 0.92             | 0.94  | 0.83  | 0.89              | 0.80                          | 0.91             | 0.82            | 0.88             | -0.92 | 0.89  | 0.96  | 0.96  | 0.94  | 0.95  | 0.97  | -0.78 | 0.97 | 1.00 |      |      |      |      |
| V                               | -0.91 | 0.90                           | 0.88  | 0.90                            | 0.89             | 0.88  | 0.74  | 0.91              | 0.80                          | 0.90             | 0.73            | 0.87             | -0.88 | 0.89  | 0.91  | 0.92  | 0.84  | 0.93  | 0.89  | -0.72 | 0.90 | 0.87 | 1.00 |      |      |      |
| Y                               | -0.76 | 0.82                           | 0.74  | 0.86                            | 0.80             | 0.86  | 0.76  | 0.74              | 0.86                          | 0.73             | 0.69            | 0.77             | -0.74 | 0.72  | 0.88  | 0.90  | 0.78  | 0.82  | 0.91  | -0.64 | 0.95 | 0.90 | 0.80 | 1.00 |      |      |
| Zr                              | -0.97 | 0.98                           | 0.86  | 0.98                            | 0.96             | 0.97  | 0.87  | 0.94              | 0.75                          | 0.96             | 0.84            | 0.92             | -0.96 | 0.93  | 0.98  | 0.98  | 0.98  | 0.99  | 0.98  | -0.82 | 0.97 | 0.98 | 0.90 | 0.87 | 1.00 |      |
| ΣREE                            | -0.85 | 0.90                           | 0.82  | 0.93                            | 0.88             | 0.93  | 0.82  | 0.83              | 0.86                          | 0.83             | 0.78            | 0.85             | -0.84 | 0.82  | 0.94  | 0.95  | 0.87  | 0.90  | 0.96  | -0.72 | 0.99 | 0.95 | 0.86 | 0.98 | 0.93 | 1.00 |

候变化造成了生产力变化,影响了  $\text{CaCO}_3$  物质的供给;海平面变化造成了溶跃层海水温度、盐度、压力等条件变化,导致溶跃层不稳定;热液活动的不规律性以及活动强度不同,造成局部海水温度、盐度等环境变化,影响碳酸盐的溶解度等<sup>[35,36]</sup>。

研究区位于深海盆地且远离大陆(距最近陆地马达加斯加约 1200km)(图 1),河流搬运的陆源物质难以直接到达;再者,研究区底层水为向北运动的南极底层水<sup>[18,35]</sup>,而该底层水流到达研究区必须穿越过西南印度洋中脊,受坡的阻挡,大量的物质将沉积在西南印度洋中脊南坡。表层水则为阿加勒斯回流,主要表现为由南向北运动趋势。因此,认为研究区陆源物质主要通过风成搬运沉积形成。

从图 9 可以看出,样品稀土元素特征与陆源物质较为相似,说明沉积物非生物组分主要受陆源物质作用。一般陆源深海沉积物 REE 分布模式表现出长距离搬运特征,表现为较 UCC 与 PAAS 富 LREE 贫 HREE,而样品则表现为相对贫 LREE 弱富 HREE(图 9),说明 REE 组成有非陆源物质作用,即洋中脊物源物质参与沉积作用造成的。

根据上述样品地球化学特征与采样点地理位置特征,说明样品非生物组分主要来源是陆源风成物质,受较弱的洋中脊原生物质作用,因此认为,非生物沉积物潜在来源有:风成搬运物质、洋中脊原生物质(玄武岩、硫化物与结核结壳物质),本文针对上述潜在物源分别进行对比分析研究。

### 3.2.2 风成物质来源分析

风成物质在全球洋盆中大规模分布主要受盛行风系统控制,具有纬向成带分布特征<sup>[38]</sup>。南印度洋的两大风成物质来源分别是东西两岸的非洲南部与

澳大利亚大陆,如图 10 所示,样品与非洲南部及澳大利亚陆源物质球粒陨石标准化稀土元素分布模式都很相似,说明前者与后两者可能有一定的物源成因关系。

根据研究区的洋流和盛行风的搬运途径分析,认为研究区可能有两大风成物质来源:低纬度东南信风搬运来自澳大利亚物质<sup>[38]</sup>,再通过亚热带洋流搬运至研究区<sup>[39,40]</sup>;西风带西风作用搬运来自非洲东南部区域物质。虽然印度洋洋流受冬、夏季风影响,但在这两个不同季风条件下,研究区表层流和次表层流基本没有变化(图 11),主要受西南信风影响<sup>[41,42]</sup>。

研究区与澳大利亚相距大于 7000km,有可能沉积来自该物源的沉积物。空气中的大颗粒物质受到风化侵蚀破碎后,可迅速提升其搬运速度和延长其搬运距离,大量证据表明大颗粒( $>62.5\mu\text{m}$ )在空气中搬运可达 10000km<sup>[43,44]</sup>。然而,风成搬运粉尘物质中大于  $1\mu\text{m}$  的颗粒在 1000km 内就大部分发生沉积<sup>[45]</sup>;根据沉降速率理论,搬运距离大于 100km 的大多数为粒径小于  $20\mu\text{m}$ <sup>[46]</sup>。

研究区垂向洋流结构较复杂<sup>[18]</sup>,洋流层间过渡水团具有对下降小颗粒物质屏蔽作用,导致远距离搬运的澳大利亚风成物质小颗粒难以沉积到达海底;其次,研究区位于南半球西风带( $35\sim65^\circ\text{S}$ )北端,且表层流表现为西南向东北运动趋势(图 11),基本不受东南信风影响,因此认为,直接通过空气从澳大利亚搬运至研究区的沉积物含量极少。研究区中来自澳大利亚的风成物质主要是通过东南信风作用,降落在南半球低纬度区,再通过南赤道流与东南马达加斯加流搬运至研究区。由于距离物源太远

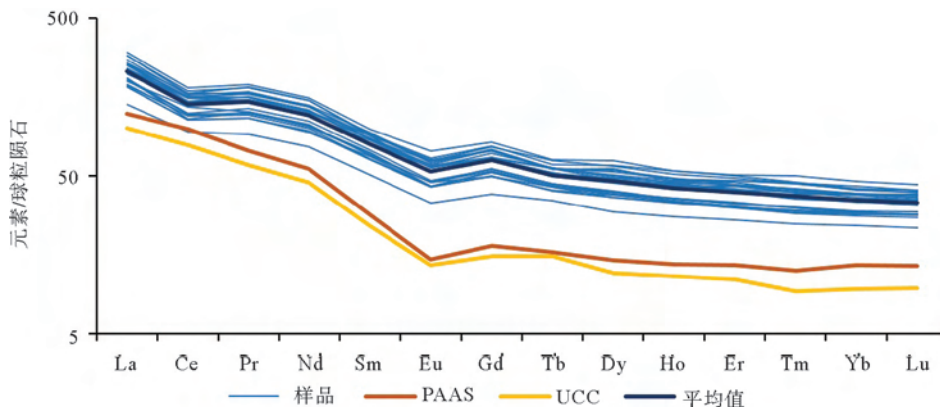


图 9 样品与 PAAS、UCC 球粒陨石标准化稀土元素模式分布

PAAS 为太古代澳大利亚页岩稀土元素标准值(据文献[36]);UCC 为上陆壳成分均值(据文献[32]);球粒陨石标准值据文献[37]

Fig. 9 The chondrite normalized rare earth elements pattern of samples, PAAS, UCC

( $>7000\text{km}$ ),因此认为,研究区来源于澳大利亚的陆源沉积物的比重较小。

根据盛行风、洋流特征、物源距离以及物质组分相似性综合分析,认为研究区的风成物质主要是通过西风带的作用将非洲南部的物质搬运沉积。如图 11 所示,在研究区到非洲东南部区域,西风带的表层流与次表层流的轨迹都经过研究区,说明了通过

西风带搬运的非洲风成物质降落海面后,有很大一部分通过洋流搬运经过研究区。根据样品—非洲南部来源物质稀土元素球粒陨石标准化分布模式(图 10),样品与非洲南部地区物源稀土元素特征非常相似,因此,认为研究区的陆源沉积物主要为非洲南部风成物质。

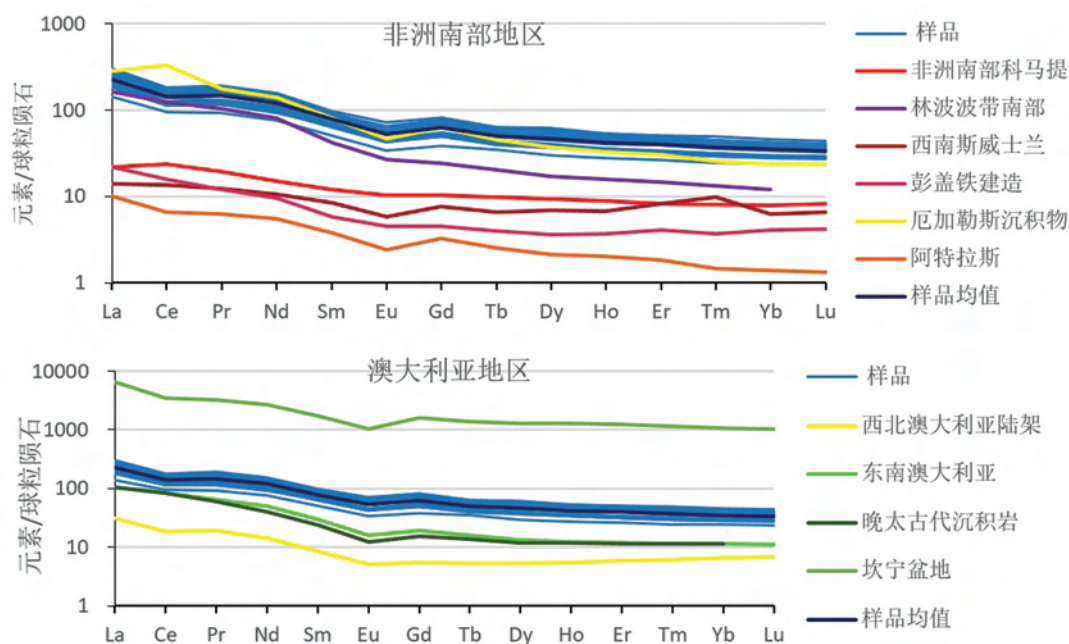


图 10 来自澳大利亚样品与非洲南部样品的物质稀土元素球粒陨石标准化分布模式  
西北澳大利亚陆架沉积物(据文献[47]);厄加勒斯沉积物(据文献[11]);阿特拉斯(据文献[48]);  
坎宁盆地石灰岩(据文献[41]);彭盖铁建造(据文献[49]);澳大利亚晚太古代沉积岩(据文献[42]);  
东南澳大利亚(据文献[50]);非洲南部科马提(据文献[51]);林波波带南部(据文献[52]);西南斯威士兰(据文献[53])

Fig.10 The chondrite normalized rare earth elements pattern suggesting the potential sediment sources from Africa and Australia

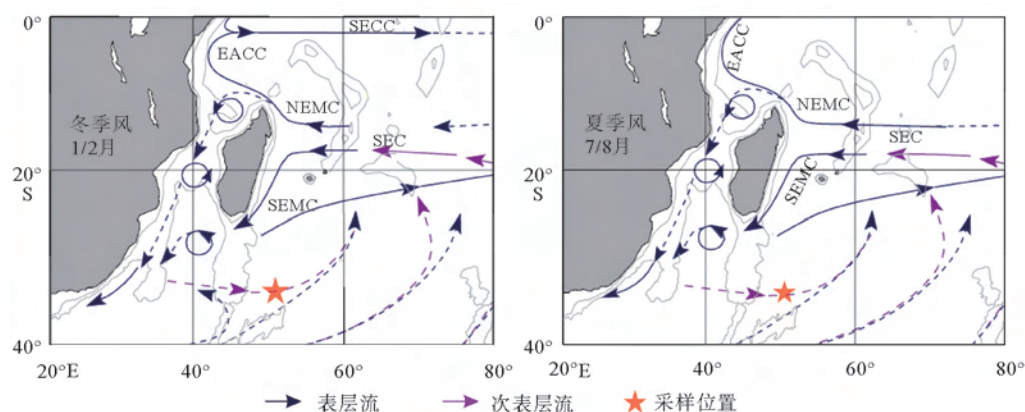


图 11 印度洋表层及次表层流分布(据文献[39])

EACC-东非洲沿岸流 (East African Coastal Current); SEC-南赤道流 (South Equatorial Current); SECC-南赤道逆流 (South Equatorial Countercurrent); NEMC (SEMC) -北(南)马达加斯加流 (Northeast and Southeast Madagascar Current)

Fig.11 The monsoon current in the Indian Ocean

### 3.2.3 洋脊原生物质

西南印度洋中脊产生的沉积物物源主要有热液成因物质、结壳<sup>[7,17,54,55]</sup>、玄武岩。随着距离洋中脊距离的增加,洋中脊热液物质快速地沉积与稀释<sup>[56]</sup>,所以洋中脊热液成因物质沉积在大洋沉积物中的分布范围主要集中在洋中脊热液区附近。

洋中脊是玄武岩产出和分布的主要区域,西南印度洋中脊是超慢速洋中脊,其热液活动一直持续<sup>[16,54]</sup>。由于样品采于洋中脊西翼的下坡处,因此认为其沉积物源可能与附近的洋中脊玄武岩有关。在西南印度洋中脊 50°S 附近,玄武岩为亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB),弱贫 LREE(LREE/HREE 均值为 1.21),低(La/Sm)<sub>N</sub> 值(0.52~0.7)<sup>[14]</sup>,而本研究样品明显富集轻稀土元素(LREE/HREE 均值为 6.29),较高的(La/Sm)<sub>N</sub> 值(2.6~3.2),与 N-MORB 稀土元素模式不同。如图 12,样品稀土元素模式分布与西南印度洋中脊玄武岩明显不同。通常洋中脊玄武岩 MgO 约为 7%~11%,较 UCC (MgO 约 2.48%)具有更高的 Mg<sup>[57,58]</sup>,从图 8 可以看出样品中非生物成因物质的 Mg 含量与 UCC 相近,与洋中脊玄武岩的取值明显不同。显然,沉积物的元素地球化学特征与西南印度洋中脊玄武岩不同,说明样品沉积物来源基本不受洋中脊玄武岩作用。

如图 12 所示,样品与附近洋中脊钙质沉积物稀土元素球粒陨石标准化分布模式相似,说明研究区沉积物物质组成较为稳定且成分相似,样品具有区域性特征,可作为区域沉积特征研究对象。其中硫化物、结核的稀土元素分布模式都与样品的稀土元素分布模式较为相似,说明这两者很有可能是样品

主要的洋脊原生物质来源。结合元素聚类结果,认为沉积物中主要洋脊物质来源可能是硫化物与富锰结壳物质。

本研究沉积物稀土元素具有 LREE 富集、HREE 亏损、以及弱 Eu 负异常的特征,(La/Sm)<sub>N</sub> 值为 2.6~3.2,都与西南印度洋脊硫化物烟卤体稀土元素特征<sup>[13,17]</sup>相似(图 12)。样品与 UCC 比值说明样品明显较 UCC 富硫元素(图 8),由于硫是热液硫化物中容易扩散运移的成分,所以认为其来源于洋中脊硫化物。

西南印度洋中脊硫化物烟卤体富 Fe、Cu、Zn,其平均含量分别为 2.83%、45.6%、3.28%<sup>[13]</sup>。本研究样品中 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 2.52%,CuO ≤ 0.01%,ZnO ≤ 0.01%。在非生物组分中 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 7%,Fe 相对 UCC 呈弱富集(图 8)。由于采样位置距离洋中脊约 220km,洋中脊热液硫化物到达的信号将明显减弱,而 Fe 元素容易溶解于海水,可长距离搬运,其异常可能形成于硫化物来源。

从稀土元素分布模式图(图 12)可以看出,本研究样品与研究区附近的富钴结壳物质<sup>[59]</sup>的稀土元素分布模式最为接近,说明沉积物中可能含有结壳物质来源。根据余芝华等<sup>[55]</sup>在西南印度洋中脊(32°~37°S,50°~57°E)采的富钴结壳研究结果,其 Mn、Fe、Co、Cu、Ni 平均值分别为 18.96%、19.71%、0.53%、0.099%、0.47%。而在本研究样品中,这些主要的结壳富集元素并未表现出明显富集。从聚类分析和主成分与上陆壳对比分析结果可以看出,Mn 元素独立其他元素且较上陆壳明显富集(约为 UCC 的 5~9 倍)(图 8)。西南印度洋中脊硫化物中 Mn<0.1%<sup>[13]</sup>,因此认为,其主要来源不

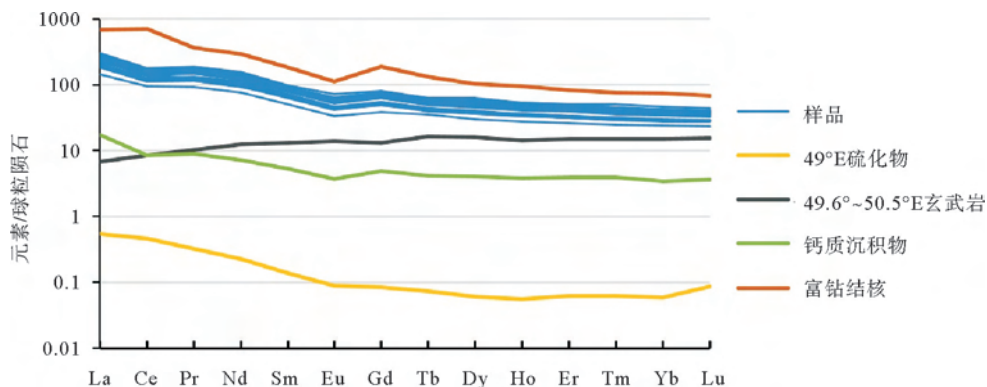


图 12 洋脊原生物质稀土元素模式球粒陨石标准化分布

西南印度洋中脊 49.6°~50.5°E 玄武岩数据引自文献[14];49°39'E 硫化物数据引自文献[13,17]

(本次引用数据为前人研究样品数据均值);结壳引自文献[59];48°~51°E 钙质沉积物数据引自文献[3,6];球粒陨石标准值引自文献[37]

Fig.12 The chondrite normalized rare earth elements pattern of ocean ridge deposits

表 4 研究区沉积物及岩石样品稀土元素特征指标平均值  
Table 4 The average REE indices of sediments and rocks

| 数据来源         | LREE    | HREE   | LREE/HREE | ΣREE    | (La/Sm) <sub>N</sub> | (La/Yb) <sub>N</sub> | δCe  | δEu  |
|--------------|---------|--------|-----------|---------|----------------------|----------------------|------|------|
| 50°E 玄武岩     | 21.23   | 17.59  | 1.21      | 38.82   | 0.54                 | 0.47                 | 0.99 | 1.08 |
| 49°E 硫化物     | 2.18    | 0.69   | 2.97      | 2.87    | 3.48                 | 8.82                 | 1.05 | 0.86 |
| 48°~51°E 沉积物 | 16.31   | 3.56   | 4.61      | 19.87   | 3.36                 | 5.39                 | 0.68 | 0.72 |
| 本研究          | 85.61   | 13.49  | 6.34      | 99.10   | 2.90                 | 6.57                 | 0.76 | 0.75 |
| 富钴结壳         | 1046.30 | 132.51 | 8.18      | 1178.82 | 82.13                | 553.21               | 1.34 | 0.20 |
| PAAS         | 132.8   | 13.0   | 10.25     | 184.0   | 4.33                 | 9.13                 | 1.01 | 0.63 |
| UCC          | 106.8   | 10.4   | 10.30     | 148.2   | 4.15                 | 10.45                | 0.99 | 0.69 |

注:硫化物据文献[13];玄武岩数据据文献[14];48°~51°E 钙质沉积物据文献[3,6];富钴结壳据文献[59]

是硫化物,而是结壳物质,根据 MnO 在样品中的均值含量 0.26%与结壳物质 Mn 均值含量为 18.96%计算,假设 UCC 中 Mn 比例为样品中陆源 Mn 含量,计算含富钴结壳物质约为样品总量的 0.67%。

西南印度洋中脊富钴结壳物质 δEu 的均值为 0.20(0.19~0.24),δCe 均值为 1.34(0.99~1.83),La<sub>CN</sub>/Lu<sub>CN</sub> 的值 4187(3279~6243)<sup>[55]</sup>,显然,结壳物质的稀土元素特征值较本研究沉积物样品明显不同(表 4),说明了结壳物质不是本研究沉积物样品非生物的主要组成。从样品中并未见到明显的结壳碎屑也说明了这一点;同时也解释了沉积物中 Mn 元素的含量明显小于结壳物质沉积物的值(约为 UCC 的 100 倍以上)。

4 结论

- (1) 根据样品不同层位的元素分布具有一致的特征,以及本研究样品与附近钙质沉积物稀土元素分布模式相似,说明研究区沉积物长期来源稳定;
- (2) 研究区沉积物以生物成因沉积物为主,占沉积物总量的 64.4%,主要由碳酸盐和生物成因二氧化硅组成,平均含量分别为 62.30%与 2.08%;
- (3) 非生物组分主要为陆源风成物质,含少量洋脊原生物质。陆源物质主要为非洲南部风成物质。沉积物中的 S 与 Mn 主要来自硫化物与富钴结壳物质,富钴结壳物质约为样品总量的 0.67%。

致谢:感谢中国大洋 35 航次船员及科考队员对沉积物样品采集的辛勤付出。

参考文献 (References)

[1] Matsuoka H. 23. A new method to evaluate dissolution of Ca-CO<sub>3</sub> in the deep-sea sediments[J]. 日本古生物学會報告・紀

事(新編), 1990, 1990 (157): 430-434.

[2] 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. [HUANG Dasong, ZHANG Xiaoyu, ZHANG Guoyin, et al. Geochemical characteristics of sediments in Southwest Indian Ridge 48.6°~51.7°E[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35 (1): 22-29.]

[3] 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. [CHEN Yuanyuan, YU Bingsong, SU Xin, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the calcareous sediments in Southwest Indian Ridge[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32 (1): 107-113.]

[4] 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.

[5] Banakar V K, Parthiban G, Pattan J N, et al. Chemistry of surface sediment along a north-south transect across the equator in the Central Indian Basin: an assessment of biogenic and detrital influences on elemental burial on the seafloor[J]. Chemical Geology 1998, 147: 217-232.

[6] Kolla V, Kidd R B. Sedimentation and Sedimentary Processes in the Indian Ocean[Z]: Springer US, 1982: 1-50.

[7] Li Z, Chu F, Jin L, et al. Major and trace element composition of surface sediments from the Southwest Indian Ridge: evidence for the incorporation of a hydrothermal component[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35 (2): 101-108.

[8] Mascarenhas-Pereira M B L, Nath B N. Selective leaching studies of sediments from a seamount flank in the Central Indian Basin: Resolving hydrothermal, volcanogenic and terrigenous sources using major, trace and rare-earth elements[J]. Marine Chemistry, 2010, 121 (1-4): 49-66.

[9] Luyendyk B P, Davies T A. Results of dsdp leg 26 and the geologic history of the southern indian ocean[R]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1974, 26.

[10] Yasukawa K, Nakamura K, Fujinaga K, et al. Rare-earth, major, and trace element geochemistry of deep-sea sediments in the Indian Ocean: Implications for the potential distribution of REY-rich mud in the Indian Ocean[J]. Geochemical Journal, 2015, 49 (6): 621-635.

- [11] Wilson D J, Piotrowski A M, Galy A, et al. Reactivity of neodymium carriers in deep sea sediments: Implications for boundary exchange and paleoceanography[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 109:197-221.
- [12] McCave I N R R S. Charles Darwin Cruise 129, report[R]. Dep. of Earth Sci., 2001.
- [13] 陶春辉, 李怀明, 黄威, 等. 西南印度洋脊 49°39'E 热液区硫化物烟囱体的矿物学和地球化学特征及其地质意义[J]. *科学通报*, 2011, 56: 2413-2423. [TAO Chunhui, LI Huaiming, HUANG Wei, et al. Mineralogical and geochemical features of sulfide chimney from the 49°39'E hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge and their geological inferences[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 2413-2423.]
- [14] 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, 23 (3): 497-508. [YU Miao, SU Xin, TAO Chunhui, et al. Petrological and geochemical features of basalts at 49.6°E and 50.5°E Hydrothermal Fields along the Southwest Indian Ridge[J]. *Geoscience*, 2013, 23 (3): 497-508.]
- [15] Tao C, Li H, Huang W, et al. Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the 49°39'E hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge and their geological inferences[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56 (26): 2828-2838.
- [16] 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.
- [17] Zeng Z, Ma Y, Yin X, et al. Factors affecting the rare earth element compositions in massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (8): 2679-2693.
- [18] McCave I N, Kiefer T, Thornalley D J R, et al. Deep flow in the Madagascar - Mascarene Basin over the last 150000 years[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363 (1826): 81-99.
- [19] Huneke H, Mulder T. Deep-sea Sediments [Z]. Elsevier, 2011.
- [20] Kolla V, Henderson L, Biscaye P E. Clay mineralogy and sedimentation in the western Indian ocean[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1976, 23 (10): 949-961.
- [21] Dick H J B, Lin J, Schouten H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge[J]. *Nature*, 2003, 426 (6965): 405-412.
- [22] Toole J M, Warren B A. A hydrographic section across the subtropical South Indian Ocean[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40 (10): 1973-2019.
- [23] 李江海, 李洪林, 韩喜球, 等. 印度洋底大地构造图[Z]. 地质出版社, 2015. [LI Jianghai, LI Honglin, HAN Xiqiu, et al. Indian Ocean Geostructure Map[Z]. *Geology Publisher*, 2015.]
- [24] 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22 (1): 23-25. [WEI Gangjian, LIU Ying, LI Xianhua, et al. Excess Al in the sediments from South China Sea[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22 (1): 23-25.]
- [25] Morse J W, Formation and Diagenesis of Carbonate Sediments[Z]. In: Mackenzie, F.T. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [26] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 甘肃科学技术出版社, 1993. [DENG Hongwen, QIAN Kai. *Sediment Geochemistry and Environment Analyse* [M]. Gansu Science Technique Publish, 1992.]
- [27] Filippelli G M, Delaney M L. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 1996, 60:1479-1495.
- [28] Invitation to Oceanography, Fifth Edition. Chapter4. Marine Sedimentation[Z]. Jones and Bartlett Publishers. www.jbpub.com/oceanlink.
- [29] Ramsay A. The distribution of calcium carbonate in deep sea sediments[R]. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Studies in Paleo-Oceanography (SP20), 1974.
- [30] Nairn AEM, Stehli FG. The Ocean Basins and Margins- the Indian Ocean[Z]. 1982.
- [31] Kolla V, Sullivan L, Streeter S S, et al. Spreading of Antarctic Bottom Water and its effects on the floor of the Indian Ocean inferred from bottom-water potential temperature, turbidity, and sea-floor photography [J]. *Marine Geology*, 1976, 21 (3): 171-189.
- [32] L R R, Shan G. Composition of the continental crust[J]. *Treatise Geochem*, 2003, 3:1-64.
- [33] Dymond J. Geochemistry of Nazca plate surface sediments: An evaluation of hydrothermal, biogenic, detrital, and hydrogenous sources [J]. *Geological Society of America Memoirs*, 1981, 154 (133-174).
- [34] Emerson S R, Archer D. Calcium carbonate preservation in the ocean[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1990, 331: 29-40.
- [35] Warren B A. Bottom water transport through the Southwest Indian Ridge[J]. *Deep Sea Research*, 1978, 25 (3): 315-321.
- [36] McLennan S M. Rare earth elements and sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21 (8): 169-200.
- [37] Boynton W V. Chapter 3-Cosmochemistry of the Rare Earth Elements; Meteorite Studies[Z]. 1983: 63-114.
- [38] Windom H L. Eolian contributions to marine sediments[J]. *Journal Sedimentatry of Petrology*, 1975, 45: 520-529.
- [39] Schott F A, Xie S-P, McCreary J P. Indian Ocean circulation and climate variability[J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47 (1).
- [40] Talley L D, Pickard G L, Emery W J, et al. Chapter 11-Indian Ocean. Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition) [Z]. Boston: Academic Press, 2011: 363-399.
- [41] Nothdurft L D, Webb G E, Kamber B S. Rare earth element

- geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia; confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68 (2): 263-283.
- [42] Nance W B, Taylor S. Rare earth element patterns and crustal evolution—I. Australian post-Archean sedimentary rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40 (12): 1539-1551.
- [43] Middleton N J, Betzer P R, Bull P A. Long-range transport of ‘giant’ aeolian quartz grains; linkage with discrete sedimentary sources and implications for protective particle transfer[J]. *Marine Geology*, 2001, 177 (3-4): 411-417.
- [44] Does M V D, Korte L F, Munday C I, et al. Particle size traces modern Saharan dust transport and deposition across the equatorial North Atlantic[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 1-27.
- [45] Schütz L, Jaenicke R, Pietrek H. Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1981, 186: 87-100.
- [46] Gillette D A, Gillette D A. Environmental factors affecting dust emission by wind erosion[J]. *Saharan Dust*, 1979: 71-91.
- [47] Liu E, Wang X C, Zhao J X, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic variations in a deep-sea sediment core from Eastern Indian Ocean: Constraints on dust provenances, paleoclimate and volcanic eruption history in the last 300,000 years[J]. *Marine Geology*, 2015, 367: 38-49.
- [48] Franchi F, Turetta C, Cavalazzi B, et al. Trace elements and REE geochemistry of Middle Devonian carbonate mounds (Maider Basin, Eastern Anti-Atlas, Morocco): Implications for early diagenetic processes [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 343: 56-71.
- [49] 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): 37-55.
- [50] Marx S K, Kamber B S, McGowan H A. Provenance of long-travelled dust determined with ultra-trace-element composition: a pilot study with samples from New Zealand glaciers [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30 (6): 699-716.
- [51] Jahn B-m, Gruau G, Glikson A Y. Komatiites of the Onverwacht Group, S. Africa; REE geochemistry, Sm/Nd age and mantle evolution[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80 (1): 25-40.
- [52] Barton Jr J M, Doig R, Smith C B, et al. Isotopic and REE characteristics of the intrusive charnoenderbite and enderbite geographically associated with the Matok Pluton, Limpopo Belt, southern Africa[J]. *Precambrian Research*, 1992, 55 (1-4): 451-467.
- [53] Kröner A, Tegtmeier A. Gneiss-greenstone relationships in the Ancient Gneiss Complex of southwestern Swaziland, southern Africa, and implications for early crustal evolution [J]. *Precambrian Research*, 1994, 67 (1-2): 109-139.
- [54] German C R. Hydrothermal activity on the eastern SWIR (50°-70°E): Evidence from core-top geochemistry, 1887 and 1998[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4 (7).
- [55] 余芝华, 范德江, 张爱滨, 等. 西南印度洋中脊富钴结壳的矿物学和地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (6): 71-80. [YU Zhihua, FAN Dejiang, ZHANG Aibin, et al. Mineralogy and geochemistry of the Co-rich ferromanganese crusts from the south west indian ridgemark[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33 (6): 71-80.]
- [56] Glasby G P. Mineralogy, geochemistry, and origin of Pacific red clays: A review[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1991, 34 (2): 167-176.
- [57] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90 (3): 297-314.
- [58] Sun S-S, Nesbitt R W, Sharaskin A Y. Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 44 (1): 119-138.
- [59] 余芝华. 西南印度洋中脊富钴结壳矿物学及地球化学研究[D]. 中国海洋大学, 2013. [YU Zhihua. Research of geochemistry and mineralogy of Co-rich crust from the south west Indian ridge[D]. Ocean University of China, 2013.]