

文章编号:1000-0550(2020)04-0727-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.085

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意义

张霄宇^{1,2,3},陶春辉^{1,4},廖时理⁴,周建平⁴,李怀明⁴,滕国超¹,黄大松¹

1. 浙江大学地球科学学院,杭州 310027

2. 浙江省海洋观测—成像试验区重点实验室,浙江舟山 316000

3. 浙江大学海洋研究院,浙江舟山 316000

4. 自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室,杭州 310012

摘要 洋中脊热液硫化物勘探技术的滞后,严重制约了对海底热液硫化物资源的勘探开发。以我国西南印度洋硫化物勘探合同区域采集的25个表层沉积物样品为研究对象,基于主量、微量和稀土元素检测数据,采用元素含量特征、相关性分析、元素对比值、特征元素三角图解,以及稀土元素分馏特征值等手段,开展沉积物热液信息研究。结果表明:样品所代表的大部分研究区域内主要为钙质生物沉积,部分样品元素地球化学特征受沉积物中玄武岩风化碎屑的影响,龙旂热液区的部分样品中表现出一定的热液迹象,稀土元素分馏特征和配分模式、(Al+K)-Mg-(Fe+Mn)三角图解可较好地指示热液活动。研究不仅为我国在西南印度洋的硫化物勘探提供基础数据参考,同时也是对海底热液硫化物勘探的沉积物地球化学找矿理论和方法的初步探索。

关键词 西南印度洋洋中脊;表层沉积物;元素地球化学;热液活动

第一作者简介 张霄宇,女,副教授,海洋环境和地球化学,E-mail: zhang_xiaoyu@zju.edu.cn

中图分类号 P736.1 P595 **文献标志码** A

0 引言

据初步估算,广泛分布于大洋中脊、岛弧和弧后盆地等不同构造环境、与海底热液活动相伴生的多金属硫化物总含量达到 6×10^8 t,其中铜和锌金属量与陆地上已经发现的新生代块状多金属硫化物矿床相当,同时富含铅、金和银等贵金属元素^[1]。近年来,随着对深海热液喷口生态保护需求的认识,未来洋中脊硫化物资源勘探将更关注非活动热液区。但是,非活动/埋藏型热液区不具备明显的羽状流找矿标志,传统的活动热液区羽状流的找矿技术不适用于该类型硫化物的找矿^[2]。因此,发展新的勘查技术、构建有效的指标体系是目前海底热液硫化物资源勘探领域急需解决的问题。

西南印度洋中脊与热点相互作用强烈^[3-5]。岩浆供给、非岩浆活动的热源、特殊的构造环境以及热点等多种因素的共同作用使得西南印度洋脊热液活动

和硫化物成矿作用非常复杂。2007—2010年,中国大洋矿产资源研究开发协会(China Ocean Mineral Resources R & D Association, COMRA)在西南印度洋脊组织了4个航次(大洋17A、19、20和21航次)共11个航段的海底热液活动调查,发现了8处热液区(点)^[6]。2011年,在国际海底管理局第17次会议上,中国大洋矿产资源研究开发协会与国际海底管理局签署了西南印度洋脊 1×10^4 km²的多金属硫化物勘探合同。

有鉴于此,本次研究尝试基于陆地水系沉积物地球化学找矿的基本原理,选取了大洋40航次第3、4航段采集获得的25个电视抓斗海底沉积物样品进行主量、微量和稀土元素检测分析,开展了以下几个方面的研究:1)研究区域内沉积物类型分布特征和元素地球化学特征研究;2)研究区域内沉积物的物质来源探讨;3)研究区域内元素地球化学异常对热液活动的指示意义及地质作用分析。通过本次研

收稿日期:2019-06-19; 收修改稿日期:2019-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41773005);国家重点研发计划课题(2018YFC0309901);国际海域资源调查与开发“十三五”项目(DY135-S1-01)[**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 41773005; National Key Research and Development Plan, No.2018YFC0309901; The 13th Five-Year Plan Project for the Investigation and Development of International Marine Resources, No. DY135-S1-01]

究,一方面为我国在西南印度洋的硫化物勘探工作探索热液硫化物活动信息;同时,也为构建玄武岩和热液产物地球化学指标提供数据样本,以丰富海底热液硫化物沉积物地球化学找矿理论和方法研究的数据库。

1 地质背景

西南印度洋脊东起罗得里格斯三联点(Rodrigues Triple Junction, RTJ),西至布维三联点(Bouvet Triple Junction, BTJ),全长约 8×10^3 km,是南极洲板块和非洲板块的重要分界线。西南印度洋脊为超慢速扩张洋脊,沿其走向从BTJ到RTJ在中央裂谷形态^[7]、地壳厚度^[8]、地形地貌特征^[9]、地幔组成^[10-11]和岩浆活动^[12-14]等方面都具有明显差别。Gallieni转换断层是西南印度洋脊的重要边界,从Gallieni转换断层向东延伸到RTJ洋中脊裂谷水深增加,火山活动减少,地幔温度降低^[3];向西至Indomed转换断层,是目前西南印度洋脊热液活动调查程度最高的海区。8~10 Ma以来该段洋脊经历了岩浆供给突然增加的过程,表现在脊轴和离轴区海底水深变浅,洋壳厚度明显比周边洋中脊区域增加。Crozet热点与西南印度洋脊的相互作用被认为是该段洋中脊异常增生的原因,但是热点与洋脊相互作用的方式和过程还存在较多争议^[3]。2007—2009年,中国大洋调查航次在该段洋脊发现的6处热液区(点),不同热液区的硫化物各具地球化学特征,主要有以龙旂热液区硫化物样品为代表的富Zn型和富Fe型,50°24' E热液区的富硅沉积物,以及长白山热液区碳酸盐沉积物。已有的热液硫化物数据为本次研究提供了背景参考。

2016年4月19日至6月2日,大洋40航次第三、四航段在西南印度洋洋脊合同区域开展了硫化物资源勘探,并通过电视抓斗采集海底沉积物样品。本次研究共挑选了25个表层沉积物样品(图1),实际站位经纬度和现场观察记录见表1。根据样品的地理位置,将样品分为四组(表1),其中S2组最接近或者位于龙旂热液区。

2 分析与数据

样品检测前在室温下解冻,并于40℃下烘干。取5g左右干样,剔除肉眼可见大颗粒岩石风化碎

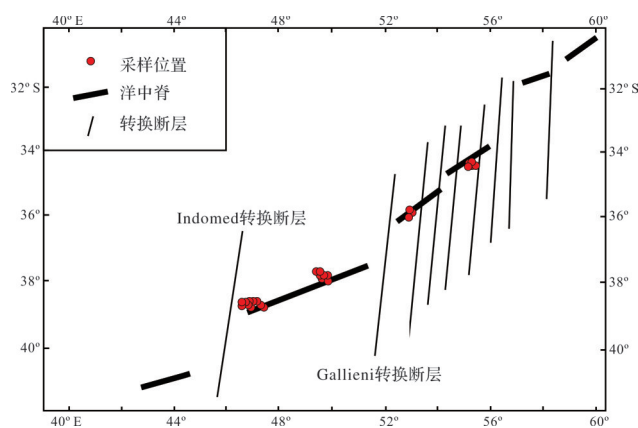


图1 采样位置示意图

Fig.1 Sampling locations

屑,用玛瑙杵仔细研磨至200目以下,以备烧失量、主量元素、微量元素和稀土元素的测定。

研磨后的样品在1000℃下加热6h,根据加热前后样品质量上的变化得到烧失量。主量元素采用X荧光光谱法(X-ray Fluorescence, XRF)测定。将样品加入含硝酸锂(LiNO_3)的助熔剂,充分混合后高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,采用X荧光光谱仪(PANalytical Axios Max)检测,准确度控制相对误差(RE)为5%,精密度控制相对偏差(RD)为10%。微量元素采用电感耦合等离子发射光谱法(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)检测。样品用四酸(即 HNO_3 - HClO_4 - HF - HCl)消解法消解后,蒸至近干后用稀盐酸溶解定容,再用ICP-OES(Varian VISTA)分析,控制相对误差(RE)为10%,控制相对偏差(RD)为10%。稀土元素测定使用电感耦合等离子体质谱法(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)。将样品加入偏硼酸锂/四硼酸锂($\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)熔剂,混合均匀,在1025℃以上的熔炉中融化。溶液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用ICP-MS(Perkin Elmer Elan 9000)分析,控制相对误差(RE)为10%,控制相对偏差(RD)为10%。各项检测结果见表2和表3。

3 结果与讨论

3.1 元素含量和组合特征

3.1.1 主量元素

研究区含量最高的主量元素是CaO,和LOI之和达28.26%~97.16%,平均值为84.65%,虽然

表1 样品采样位置和现场观察记录

Table 1 Sampling locations and field observation record

| 分组 | 编号 | 定名 | 基本属性 | |
|------|------|--------------------|--|---|
| S1 | XY02 | 灰白色粉砂质含 有孔虫软泥 | 灰白色粉末状沉积物,较为致密,无明显大颗粒,粉砂状,镜下观察为有孔虫。 | |
| | XY03 | 白色钙质硅酸盐 软泥 | 灰白色沉积物,颗粒较细,有一定黏度。不含有孔虫等生物成分,致密土块状,易成粉末。 | |
| | XY07 | 灰白色有孔虫砂 | 白色松散沉积物,主要成分是有孔虫,粒径较大,主要在0.1~0.2 mm之间。含黑色火山玻璃的黑色玄武岩碎屑,玄武岩碎块粒径为0.5~5 cm,气孔状构造发育,并可见少量的灰色玄武岩火山玻璃,火山玻璃为油脂光泽,贝壳状断口。 | |
| | XY08 | 白色钙质有孔虫 软泥 | 白色黏土状沉积物,颗粒极细,肉眼无法分辨。黏度较高,遇盐酸完全溶解,主要成分是钙质。 | |
| | XY09 | 灰黄色含生物碎 屑的钙质沉积物 | 灰黄色,弱黏性,半流动,含砾钙质沉积,砾石为隐晶质,有大量生物碎屑,如珊瑚、有孔虫壳体、双壳累壳体等。含玻璃质的黑色玄武岩碎块,成块状,粒径在3~4 cm之间,发育有气孔和杏仁构造,隐晶质,少量玻璃质,可见贝壳状断口和油脂光泽。 | |
| | X10 | 灰黄色含生物碎 屑的钙质沉积物 | 灰黄色。弱黏性,半流动,含砾钙质沉积,砾石为隐晶质,有大量生物碎屑,如珊瑚、有孔虫壳体、双壳累壳体等。灰白色钙质软泥。 | |
| | XY11 | 灰白色有孔虫 软泥 | 灰白色,较为疏松。粒径在0.1 mm左右,较为均匀,成分为有孔虫,含少量玄武岩碎屑,粒径在0.5~5 mm之间。 | |
| | XY15 | 灰白色钙质软泥 | 灰白色松散沉积物,黏度一般,主要成分是有孔虫壳体,并含有较多的火山碎屑成分。 | |
| | XY25 | 浅褐色钙质软泥 | 浅褐色沉积物,无气味,弱黏性,分选性好,主要成分为有孔虫,含少量的火山岩石碎屑。 | |
| | S2 | XY13 | 灰白色有孔虫 软泥 | 松散沉积物,黏性较小,主要为有孔虫壳体,粒径在0.2~0.5 mm之间,并含有少量碎屑 |
| | | XY16 | 灰白色钙质软泥 | 灰白色松散沉积物,黏度一般,主要成分是细砂,生物成分,并含有丰富的有孔虫壳体。 |
| XY18 | | 灰白色钙质软泥 | 灰白色沉积物,黏度较大,主要成分为有孔虫壳体,并含有少量的火山碎屑玻璃和生物壳体。 | |
| XY19 | | 灰白色钙质软泥 | 灰白色沉积物,强黏性,有生物遗迹,主要成分是有孔虫壳体。 | |
| XY20 | | 灰白色钙质软泥 | 灰白色沉积物,粒度极细,强黏性。 | |
| XY21 | | 灰黑色钙质软泥 | 主要成分为有孔虫壳体,粒径在0.2~0.5 mm之间,弱黏性。 | |
| XY22 | | 灰黑色火山碎屑 钙质软泥 | 沉积物为黑白色,质地较软,主要成分为有孔虫壳体。 | |
| XY23 | | 灰黑色玄武岩 碎屑 | 碎屑呈菱角状,粒径从毫米级到2厘米不等,磨圆度较差。 | |
| XY24 | | 绿泥石化玄武岩 | 岩石蚀变程度较高,表面可见大量绿泥石,可见一些红褐色氧化带。 | |
| S3 | | XY12 | 灰白色钙质中 粗砂 | 灰白色沉积物,极为松散,粒径大约为1 mm,遇盐酸剧烈起泡,为钙质沉积物。 |
| | XY14 | 灰白色钙质软泥 | 沉积物灰白色,较为松散,弱黏性,有丰富的有孔虫壳体,并含有少量的火山岩碎屑。 | |
| | XY17 | 灰白色钙质黏土 | 灰白色松散沉积物,主要成分为有孔虫颗粒,含有少量岩石碎屑,其中大部分碎屑已经蚀变。 | |
| S4 | XY01 | 灰色有孔虫钙质 软泥 | 较为松散的灰色沉积物,弱黏性,98%为有孔虫壳体,粒径均匀。 | |
| | XY04 | 灰白色钙质软泥 | 灰白色沉积物,黏度较小,颗粒感明显。 | |
| | XY05 | 灰白色钙质软泥 | 颗粒细腻,有明显黏度。 | |
| | XY06 | 灰色粉砂质有 虫钙质软泥 | 灰色粉砂质沉积物,较疏松,无明显的大颗粒,弱黏性。 | |

XY22~XY24这3个样品中CaO和LOI含量相对较低,但CaO依然是含量最丰富的主量元素,可见钙质成分是这个区域沉积物中最主要成分。K₂O、Na₂O和SO₃含量相关性较弱,含量范围分别为0.07%~0.49%、0.61%~5.01%和0.1%~0.33%,平均值分别为0.16%、1.22%和0.23%。而其他主量元素与CaO和LOI在含量上呈此消彼长的关系:其中SiO₂的含量范围为0.91%~38.5%,平均值为7.91%;Al₂O₃的含量范围为0.23%~10.67%,平均值为2.26%;TF_eO₃的含量范围

为0.22%~10.17%,平均值为1.75%;MgO的含量范围为0.12%~8.29%,平均值为1.26%;TiO₂的含量范围为0.01%~1.02%,平均值为0.16%;MnO的含量范围为0.02%~3.87%,平均值为0.21%;值得注意的是在站位XY22中MnO出现了异常高值3.87%。由此可将区域内沉积物可分为两种类型:1)富含CaO和LOI;CaO含量大于45%,研究区域内大部分沉积样品属于这一类型,主要包括样品XY01~XY20、XY25,表明样品所代表的区域以钙质生物沉积为主。

表2 主量元素含量(wt.%)
Table 2 Content of major elements (wt.%)

| 编号 | Al ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ | SO ₃ | TFe ₂ O ₃ | MnO | TiO ₂ | LOI |
|------|--------------------------------|-------|------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|---------------------------------|------|------------------|-------|
| XY01 | 0.42 | 52.5 | 0.09 | 0.12 | 0.61 | 1.88 | 0.16 | 0.32 | 0.03 | 0.01 | 43.16 |
| XY02 | 1.06 | 49.9 | 0.18 | 0.29 | 1.16 | 4.18 | 0.27 | 0.55 | 0.04 | 0.04 | 42.24 |
| XY03 | 1.59 | 49.1 | 0.28 | 0.49 | 0.87 | 5.73 | 0.20 | 0.86 | 0.03 | 0.07 | 40.75 |
| XY04 | 2.67 | 45.8 | 0.16 | 1.29 | 1.44 | 8.63 | 0.22 | 2.05 | 0.07 | 0.27 | 37.42 |
| XY05 | 0.96 | 50.6 | 0.14 | 0.23 | 0.76 | 3.44 | 0.21 | 0.56 | 0.03 | 0.04 | 42.37 |
| XY06 | 0.26 | 52.4 | 0.07 | 0.19 | 1.02 | 1.44 | 0.24 | 0.22 | 0.03 | 0.01 | 43.95 |
| XY07 | 0.26 | 53.2 | 0.07 | 0.17 | 0.98 | 0.91 | 0.19 | 0.24 | 0.03 | 0.01 | 43.96 |
| XY08 | 1.02 | 50.2 | 0.17 | 0.26 | 1.04 | 4.11 | 0.26 | 0.53 | 0.03 | 0.04 | 42.28 |
| XY09 | 0.70 | 51.3 | 0.10 | 0.47 | 0.89 | 2.33 | 0.29 | 0.53 | 0.06 | 0.04 | 43.1 |
| XY10 | 1.73 | 48.6 | 0.24 | 0.59 | 1.16 | 6.04 | 0.25 | 0.98 | 0.04 | 0.08 | 40.21 |
| XY11 | 0.92 | 50.9 | 0.14 | 0.25 | 0.84 | 3.40 | 0.21 | 0.54 | 0.02 | 0.04 | 42.38 |
| XY12 | 0.30 | 52.3 | 0.07 | 0.50 | 0.94 | 1.56 | 0.20 | 0.44 | 0.04 | 0.02 | 43.6 |
| XY13 | 0.48 | 51.8 | 0.12 | 0.23 | 1.06 | 1.99 | 0.22 | 0.60 | 0.03 | 0.02 | 43.51 |
| XY14 | 0.23 | 52.1 | 0.07 | 0.41 | 1.00 | 1.14 | 0.21 | 0.28 | 0.02 | 0.01 | 44.09 |
| XY15 | 2.40 | 48.7 | 0.11 | 0.74 | 0.67 | 6.66 | 0.16 | 1.30 | 0.04 | 0.10 | 38.96 |
| XY16 | 0.56 | 51.9 | 0.11 | 0.21 | 1.04 | 2.03 | 0.25 | 0.46 | 0.03 | 0.02 | 43.48 |
| XY17 | 1.16 | 49.6 | 0.16 | 0.85 | 0.88 | 4.44 | 0.21 | 0.97 | 0.05 | 0.09 | 41.15 |
| XY18 | 1.03 | 49.7 | 0.17 | 0.32 | 1.10 | 4.18 | 0.28 | 0.70 | 0.02 | 0.04 | 42.43 |
| XY19 | 1.13 | 50.3 | 0.25 | 0.36 | 0.77 | 4.54 | 0.19 | 0.79 | 0.02 | 0.06 | 41.65 |
| XY20 | 1.20 | 48.8 | 0.21 | 0.34 | 1.20 | 5.02 | 0.29 | 0.82 | 0.04 | 0.05 | 41.78 |
| XY21 | 3.66 | 39.3 | 0.16 | 3.09 | 1.04 | 14.71 | 0.19 | 3.57 | 0.07 | 0.30 | 33.88 |
| XY22 | 10.67 | 12.20 | 0.49 | 8.29 | 5.01 | 35.30 | 0.10 | 7.46 | 3.87 | 0.71 | 16.06 |
| XY23 | 10.02 | 26.8 | 0.14 | 4.39 | 2.00 | 29.90 | 0.25 | 7.27 | 0.38 | 0.85 | 17.13 |
| XY24 | 10.50 | 17.20 | 0.12 | 6.97 | 1.94 | 38.53 | 0.33 | 10.17 | 0.15 | 1.02 | 12.55 |
| XY25 | 1.59 | 48.3 | 0.19 | 0.48 | 1.14 | 5.63 | 0.25 | 1.46 | 0.16 | 0.08 | 40.74 |

2) 富含 Al₂O₃、MgO、SiO₂、TFe₂O₃、MnO、TiO₂；CaO 和 LOI 含量较低,仅限于 XY21~XY24 等 4 个样品,其中 XY21 样品的 CaO 和 LOI 含量分别为 39.3% 和 33.88%,虽然远远大于 XY22~XY24 等其他 3 个样品,但明显小于富钙质沉积样品,考虑到该样品中 Al₂O₃、MgO、SiO₂、TFe₂O₃、MnO、TiO₂ 含量均显著高于富钙质沉积,因此认为 XY21 和 XY22~XY24 同属于富含碎屑的沉积样品。

3.1.2 微量元素和稀土元素

微量元素和稀土元素在不同的沉积物中也表现出显著的差异(表 3、图 2): 1) 富钙质样品(XY01~XY20、XY25)由于受强烈的钙质生物稀释作用,大部分的微量元素和稀土元素的含量与大陆上地壳平均值(UCC)相比均表现为明显低值。只有 Sr 元素含量比大陆上地壳高 4.5 倍,表明 Sr 可以类质同象的形式存在于钙质矿物晶体。2) 富碎屑沉积样品中(XY21~XY24), Co、Cu、Mo、Ni、Sb、Sc、U 元素明显比大陆上地壳富集,尤其是 Sb 和 U 分别富集 466.92 倍和 42.06 倍; As、Pb 元素含量与大陆上地壳相当;

Ba、Cs、Ga、Nb、P、Rb、Sr、Th、V、Y、Zn、Zr 和 REE 元素含量则表现为亏损。其中,表现为相比大陆上地壳富集或含量相当的金属元素,多为亲硫元素,而表现为亏损的,则多为亲石元素。

对沉积物样品进一步采用因子分析划分其元素组合,以判断可能的物质来源,结果见表 4。在 F1 主因子轴上, Al₂O₃、MgO、SiO₂、TFe₂O₃、TiO₂、LOI、Cr、Cu、Ga、Mo、Ni、Sb、Sc、V、Y、Zn、Zr 元素具有正载荷值,而 CaO 和 LOI 具有负载荷值,显然该因子反映了碎屑风化沉积与钙质沉积此消彼长的关系。F1 因子的方差贡献达 41.51%,表明钙质沉积和碎屑风化沉积是控制研究区沉积物地球化学特征的主要因素。在 F2 主因子轴上, K₂O、Ba、Cs、Nb、P、Rb、Sr、Th、U、Y、REE 具有正载荷值,说明 F2 因子可能代表了来源于自生化学沉淀与碎屑风化沉积的共同作用。F3 因子的元素组合为 As、Co、Mn、Pb,可能代表了和热液有关的沉积因素。考虑 F3 因子的方差贡献仅有 13.84%,初步判断热液作用对研究区域内沉积物的影响相对较小。F4 因子的元素组合仅有 Na₂O 和

表3 微量元素和稀土元素含量 ($\times 10^{-6}$)
Table 3 Contents of trace elements and rare earth elements ($\times 10^{-6}$)

| 编号 | XY01 | XY02 | XY03 | XY04 | XY05 | XY06 | XY07 | XY08 | XY09 | XY10 | XY11 | XY12 | XY13 | XY14 | XY15 | XY16 | XY17 | XY18 | XY19 | XY20 | XY21 | XY22 | XY23 | XY24 | XY25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| As | 2.3 | 2.2 | 1.9 | 3.1 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 3.2 | 3.1 | 1.8 | 2 | 2.3 | 3.1 | 2.3 | 2.4 | 2.9 | 2.4 | 2.9 | 1.8 | 3.6 | 2.2 | 3.7 | 10.8 | 1.8 | 5.4 |
| Ba | 302 | 443 | 382 | 77.1 | 334 | 209 | 42.7 | 451 | 174.5 | 504 | 364 | 21.2 | 146.5 | 45 | 130 | 205 | 391 | 457 | 370 | 536 | 306 | 376 | 88.8 | 95.5 | 145 |
| Co | 6 | 4.9 | 5.8 | 12.4 | 5.6 | 6.7 | 6.2 | 4.8 | 25.4 | 5.3 | 5.3 | 12.1 | 5.8 | 7.1 | 8.6 | 4.9 | 9.8 | 5.4 | 5.4 | 6.4 | 15.6 | 45.1 | 124.5 | 41.4 | 45.9 |
| Cr | 5 | 30 | 15 | 36 | 9 | 4 | 4 | 26 | 7 | 18 | 8 | 27 | 9 | 18 | 18 | 9 | 55 | 10 | 10 | 11 | 69 | 167 | 145 | 188 | 19 |
| Cs | 0.21 | 0.4 | 0.73 | 0.25 | 0.33 | 0.13 | 0.13 | 0.4 | 0.25 | 0.49 | 0.32 | 0.12 | 0.24 | 0.11 | 0.21 | 0.25 | 0.39 | 0.4 | 0.62 | 0.5 | 0.33 | 0.78 | 0.13 | 0.15 | 0.32 |
| Cu | 17.1 | 26.4 | 28.5 | 24.8 | 26.6 | 13.7 | 7.3 | 26.3 | 9.6 | 22.7 | 25.2 | 9.9 | 11.8 | 9.8 | 20.5 | 15.2 | 27.6 | 34.3 | 11.5 | 39.1 | 151 | 101 | 42.2 | 197.5 | 28.3 |
| Ga | 1.5 | 1.6 | 2.5 | 3.2 | 1.4 | 0.5 | 0.6 | 1.6 | 1 | 2.2 | 1.4 | 0.6 | 0.9 | 0.5 | 2.1 | 0.9 | 2 | 1.5 | 2.1 | 1.9 | 5.2 | 13.2 | 11.2 | 13.5 | 2.1 |
| Mo | 0.14 | 0.18 | 0.08 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.21 | 0.59 | 0.2 | 0.14 | 0.31 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.58 | 0.16 | 0.1 | 0.19 | 1.02 | 27.1 | 2.8 | 0.33 | 0.77 |
| Nb | 0.5 | 0.9 | 1.5 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 1 | 0.8 | 1.2 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.9 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 1 | 0.9 | 0.7 | 3.9 | 1.3 | 1.9 |
| Ni | 7.6 | 11.5 | 12.9 | 20.8 | 9.2 | 6.3 | 5.4 | 10.6 | 9.5 | 12.8 | 8.2 | 18.5 | 7.1 | 14.4 | 10.6 | 6.7 | 44.2 | 8.5 | 8.3 | 10 | 39.7 | 175 | 72.3 | 92.9 | 25.6 |
| P | 190 | 240 | 380 | 200 | 190 | 170 | 90 | 250 | 200 | 290 | 190 | 110 | 120 | 120 | 150 | 180 | 300 | 290 | 350 | 330 | 340 | 320 | 570 | 470 | 200 |
| Pb | 3.1 | 3.7 | 3.6 | 6.7 | 4.2 | 2.9 | 3 | 3.9 | 9.4 | 3.2 | 3.3 | 4.8 | 3.4 | 3.7 | 4.4 | 3.8 | 4.4 | 3.7 | 2.8 | 4.9 | 6 | 3.6 | 35.3 | 4.7 | 26.2 |
| Rb | 3.3 | 7.3 | 12.3 | 3.9 | 5.6 | 2 | 2.3 | 7.3 | 4 | 9.1 | 5.7 | 1.8 | 4.2 | 1.8 | 4.1 | 4 | 6.2 | 6.9 | 10.7 | 8.6 | 5.4 | 7.8 | 3.1 | 2.8 | 6.6 |
| Sb | 0.19 | 0.32 | 0.19 | 0.22 | 0.1 | 0.49 | 0.11 | 1.17 | 0.2 | 0.19 | 0.09 | 0.18 | 0.13 | 0.11 | 0.14 | 0.08 | 0.18 | 0.12 | 0.14 | 0.18 | 0.16 | 2.12 | 0.6 | 0.19 | 0.53 |
| Sc | 1.5 | 1.9 | 3 | 5.8 | 2 | 1.4 | 1.2 | 1.9 | 1.6 | 2.5 | 1.6 | 1.4 | 1.6 | 1.2 | 3.8 | 1.5 | 3.6 | 2.1 | 2.5 | 2.8 | 11.3 | 24.2 | 22.4 | 29.2 | 3 |
| Sr | 1426 | 1552 | 1625 | 1189 | 1431 | 1395 | 1285 | 1656 | 2139 | 1396 | 1445 | 1249 | 1295 | 1247 | 1249 | 1370 | 1313 | 1679 | 1541 | 1772 | 1153 | 378 | 984 | 424 | 1240 |
| Th | 0.69 | 1.06 | 1.65 | 0.71 | 0.86 | 0.48 | 0.42 | 1.12 | 0.93 | 1.18 | 0.87 | 0.48 | 0.6 | 0.47 | 0.58 | 0.64 | 1.08 | 0.99 | 1.21 | 1.19 | 0.7 | 0.29 | 1.34 | 0.36 | 1.17 |
| U | 0.19 | 0.25 | 0.6 | 0.17 | 0.23 | 0.12 | 0.1 | 0.29 | 0.48 | 0.37 | 0.2 | 0.11 | 0.19 | 0.11 | 0.18 | 0.2 | 0.28 | 0.29 | 0.59 | 0.4 | 0.36 | 0.22 | 0.5 | 0.43 | 0.28 |
| V | 7 | 11 | 18 | 48 | 11 | 4 | 4 | 12 | 14 | 19 | 11 | 7 | 8 | 5 | 33 | 9 | 19 | 14 | 14 | 17 | 74 | 149 | 189 | 247 | 25 |
| Y | 9.5 | 10.2 | 14 | 11.3 | 8.1 | 8 | 4.9 | 10.8 | 7.7 | 11.2 | 7.9 | 6 | 7.7 | 6.9 | 6.7 | 7 | 14 | 10.4 | 10.1 | 12.4 | 15.6 | 19.4 | 22 | 29.3 | 6.7 |
| Zn | 11 | 18 | 23 | 25 | 14 | 10 | 8 | 15 | 13 | 21 | 14 | 11 | 15 | 9 | 17 | 12 | 18 | 16 | 15 | 18 | 84 | 84 | 73 | 118 | 30 |
| Zr | 7 | 10 | 15 | 23 | 9 | 4 | 4 | 11 | 7 | 15 | 9 | 4 | 7 | 4 | 11 | 6 | 14 | 9 | 14 | 11 | 23 | 39 | 57 | 63 | 18 |
| La | 5.7 | 6.8 | 10 | 5.2 | 5.4 | 4.8 | 3.3 | 7.1 | 6.2 | 7.4 | 5.4 | 5.4 | 4.4 | 4.4 | 3.8 | 4.4 | 8 | 6.8 | 6.6 | 8.3 | 5.5 | 2.7 | 7.6 | 3.4 | 5.8 |
| Ce | 6.2 | 7.8 | 11.7 | 10.2 | 6.7 | 5.4 | 5 | 8.2 | 10.9 | 8.7 | 6.6 | 7 | 5.3 | 6.1 | 6.5 | 5.8 | 9.6 | 7.3 | 8.7 | 9.1 | 7.3 | 6.4 | 25.6 | 8 | 22 |
| Pr | 1.3 | 1.54 | 2.19 | 1.28 | 1.15 | 0.97 | 0.64 | 1.58 | 1.26 | 1.56 | 1.11 | 0.89 | 0.83 | 0.87 | 0.82 | 0.86 | 1.82 | 1.39 | 1.36 | 1.76 | 1.32 | 1 | 2.03 | 1.31 | 1.22 |
| Nd | 5.1 | 6 | 9 | 5.5 | 4.6 | 4.1 | 2.5 | 6.1 | 5.4 | 6.5 | 4.9 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.4 | 3.7 | 7.4 | 5.8 | 5.4 | 7.4 | 5.9 | 5.3 | 9.4 | 7.6 | 4.4 |
| Sm | 1.1 | 1.33 | 1.9 | 1.44 | 0.97 | 0.96 | 0.55 | 1.31 | 1.03 | 1.33 | 1.02 | 0.73 | 0.77 | 0.85 | 0.94 | 0.75 | 1.68 | 1.31 | 1.18 | 1.44 | 1.58 | 1.84 | 2.75 | 2.74 | 0.96 |
| Eu | 0.2 | 0.29 | 0.45 | 0.39 | 0.23 | 0.2 | 0.14 | 0.29 | 0.22 | 0.3 | 0.23 | 0.16 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.18 | 0.4 | 0.31 | 0.25 | 0.36 | 0.44 | 0.64 | 0.87 | 0.95 | 0.21 |
| Gd | 1.3 | 1.35 | 1.87 | 1.72 | 1.03 | 1 | 0.63 | 1.46 | 1.03 | 1.53 | 1.05 | 0.77 | 0.87 | 0.93 | 0.91 | 0.81 | 1.89 | 1.38 | 1.11 | 1.57 | 1.95 | 2.57 | 3.39 | 3.78 | 0.99 |
| Tb | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.27 | 0.16 | 0.15 | 0.1 | 0.21 | 0.16 | 0.23 | 0.16 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.13 | 0.3 | 0.22 | 0.18 | 0.25 | 0.35 | 0.47 | 0.56 | 0.7 | 0.16 |
| Dy | 1.3 | 1.29 | 1.78 | 1.61 | 1.02 | 0.99 | 0.62 | 1.31 | 0.96 | 1.48 | 1.01 | 0.76 | 0.88 | 0.87 | 0.97 | 0.85 | 1.82 | 1.27 | 1.14 | 1.58 | 2.09 | 3.23 | 3.65 | 4.7 | 0.94 |
| Ho | 0.3 | 0.28 | 0.38 | 0.36 | 0.22 | 0.21 | 0.14 | 0.3 | 0.2 | 0.33 | 0.23 | 0.17 | 0.2 | 0.19 | 0.21 | 0.19 | 0.4 | 0.28 | 0.25 | 0.35 | 0.47 | 0.71 | 0.78 | 1.03 | 0.2 |
| Er | 0.8 | 0.76 | 1.08 | 1.04 | 0.61 | 0.61 | 0.4 | 0.86 | 0.56 | 0.9 | 0.66 | 0.48 | 0.59 | 0.55 | 0.61 | 0.53 | 1.12 | 0.8 | 0.73 | 0.96 | 1.37 | 2.02 | 2.19 | 3 | 0.58 |
| Tm | 0.1 | 0.11 | 0.16 | 0.15 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.13 | 0.08 | 0.13 | 0.1 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.17 | 0.12 | 0.11 | 0.14 | 0.2 | 0.29 | 0.32 | 0.43 | 0.09 |
| Yb | 0.7 | 0.68 | 1 | 0.97 | 0.58 | 0.57 | 0.38 | 0.82 | 0.5 | 0.85 | 0.64 | 0.45 | 0.58 | 0.52 | 0.58 | 0.49 | 1.09 | 0.76 | 0.71 | 0.89 | 1.29 | 1.84 | 2.1 | 2.76 | 0.58 |
| Lu | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0.14 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.13 | 0.08 | 0.13 | 0.1 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.17 | 0.12 | 0.11 | 0.14 | 0.19 | 0.28 | 0.32 | 0.42 | 0.09 |

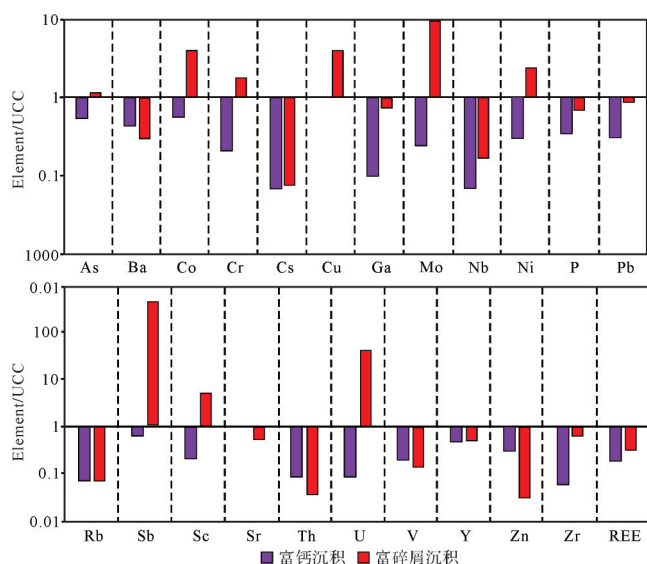


图2 样品的微量元素和稀土元素含量与大陆上地壳 (UCC)^[15]比较

Fig.2 Content of trace elements and rare earth elements in the sample compared with the continental upper crust (UCC)^[15]

SO₃,且其方差贡献仅有6.35%,判断可能部分代表海水残留这一因素。

3.2 元素比值特征及其物源指示意义

3.2.1 Zr/Ti-Al/Ti与Si/Ti-Al/Ti

Ti作为一种在沉积过程中相对稳定的主量元素,通常认为是碎屑源区的指标,用其作为标准化元素可以追踪其他元素在风化搬运沉积中的行为^[16-18]。本研究25个样品的Al/Ti值在8.58~43.33之间,平均值为20.20,与大陆上地壳平均Al/Ti值21.2^[17]和南海东北部泥质沉积的Al/Ti值18.50^[19]接近,但样品之间的Al/Ti值明显出现分异(图3):

XY04、XY17、XY21~XY24等6个样品的Al/Ti值在8.58~12.42之间,平均值为10.55,明显低于大陆上地壳和南海东北部泥质沉积,与SWIR玄武岩9.65十分接近^[20]。其余样品则与大陆上地壳的比值相近,其中XY01样品的Al/Ti值为43.33,明显高于大陆上地壳和南海东北部泥质沉积。因此,根据Zr/Ti-Al/Ti与Si/Ti-Al/Ti,可以初步判定本次研究的25个表层沉积样品可能接受了陆源和西南印度洋中脊玄武岩风化产物,但是局部区域内沉积物中碎屑组分受陆源物质或玄武岩风化作用影响的程度存在着差异。

3.2.2 (Al+K)-Mg-(Fe+Mn)

考虑到研究区临近49.6°E热液喷口^[21],并且部分样品的亲硫元素含量较高(如XY22~XY24样品的TFe₂O₃、MnO、Pb、Mo等元素),故须考虑热液活动的

可能影响。本次研究采用了Al/(Al+Fe+Mn)<0.5(亦有文献认为应<0.3)^[20,22]作为判别富金属沉积物的指标(图4)。本次研究样品的Al/(Al+Fe+Mn)值在0.38~0.59之间,平均值为0.5,其中XY12和XY13具有极小值,分别为0.39和0.38;XY21~XY25样品均低于0.5。对比西南印度洋中脊49.6°E热液产物其Al/(Al+Fe+Mn)平均值0.01^[20],大西洋中脊Rainbow区热液产物其Al/(Al+Fe+Mn)值在0.20~0.37之间^[23],本次研究样品的Al/(Al+Fe+Mn)值明显较高。因此,对于

表4 富钙质样品因子旋转载荷矩阵
Table 4 Factor rotating load matrix for calcium-rich samples

| 主因子 | F1 | F2 | F3 | F4 |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Al ₂ O ₃ | 0.893 | | | |
| CaO | -0.954 | | | |
| K ₂ O | | 0.931 | | |
| MgO | 0.977 | | | |
| Na ₂ O | | | | 0.750 |
| SiO ₂ | 0.936 | | | |
| SO ₃ | | | | 0.878 |
| TFe ₂ O ₃ | 0.967 | | | |
| TiO ₂ | 0.943 | | | |
| LOI | -0.941 | | | |
| As | | | 0.798 | |
| Ba | | 0.775 | | |
| Co | | | 0.955 | |
| Cr | 0.844 | | | |
| Cs | | 0.977 | | |
| Cu | 0.885 | | | |
| Ga | 0.914 | | | |
| Mn | | | 0.909 | |
| Mo | 0.623 | | | |
| Nb | | 0.739 | | |
| Ni | 0.725 | | | |
| P | | 0.869 | | |
| Pb | | | 0.979 | |
| Rb | | 0.976 | | |
| Sb | 0.66 | | | |
| Sc | 0.987 | | | |
| Sr | | 0.685 | | |
| Th | | 0.970 | | |
| U | | 0.882 | | |
| V | 0.964 | | | |
| Y | 0.628 | 0.616 | | |
| Zn | 0.925 | | | |
| Zr | 0.787 | | | |
| REE | | 0.788 | | |
| 方差贡献/% | 41.51 | 24.55 | 13.84 | 6.35 |
| 累积方差贡献/% | 41.51 | 66.06 | 79.90 | 86.25 |

注:载荷绝对值<0.6的未显示。

部分 Al/(Al+Fe+Mn)相对较低的样品,需要进一步分析探讨研究区域内部分样品可能存在热液沉积组分的输入。

根据前述 Zr/Ti-Al/Ti 与 Si/Ti-Al/Ti 判断,部分样品如 XY04、XY17、XY21-XY24 中碎屑组分可能主要来源于西南印度洋中脊玄武岩的风化作用,而样品的 Al/(Al+Fe+Mn)也接近研究区玄武岩值 0.46^[20],因此判断部分样品很可能继承了碎屑组分。本次研究选取玄武岩、橄榄石斑晶和热液沉积物的投影点作为构建 (Al+K)-Mg-(Fe+Mn) 三端元模型^[22,24]的顶角

点,同时将平均大陆上地壳^[5]、研究区的玄武岩^[20]和橄榄石斑晶^[25]、Carlsberg 海岭含热液组分的钙质沉积^[22]作为参照物一起投影,认为在这个三角形区域内的样品受热液影响。结果显示,大多数样品都围绕在西南印度洋中脊玄武岩和平均大陆上地壳的投影点之间,表明这些样品基本不受热液影响;XY21、XY22、XY24 这 3 个样品的投影落在热液影响的三角形区域内,并且均更加靠近西南印度洋中脊玄武岩的投影点,指示这部分样品可能受到一定程度热液作用的影响。

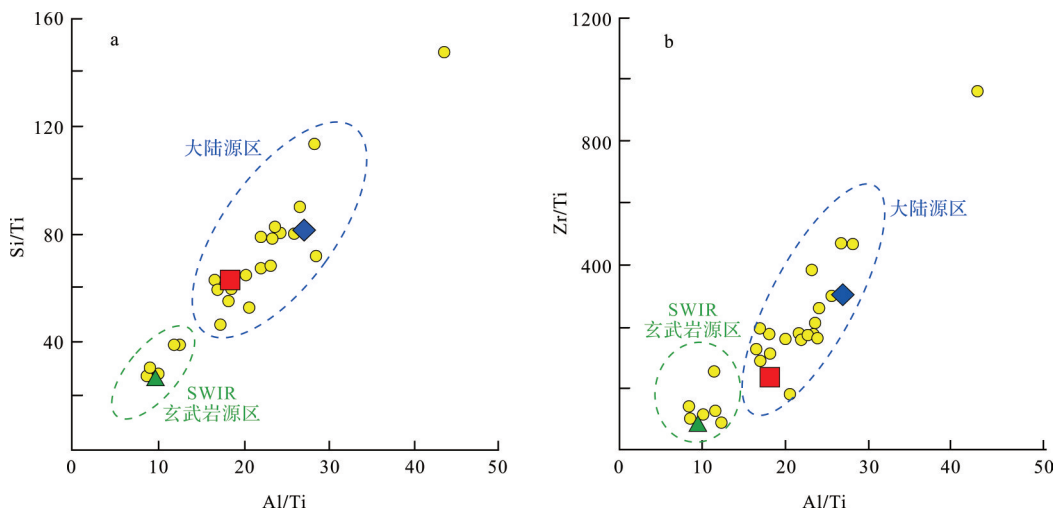
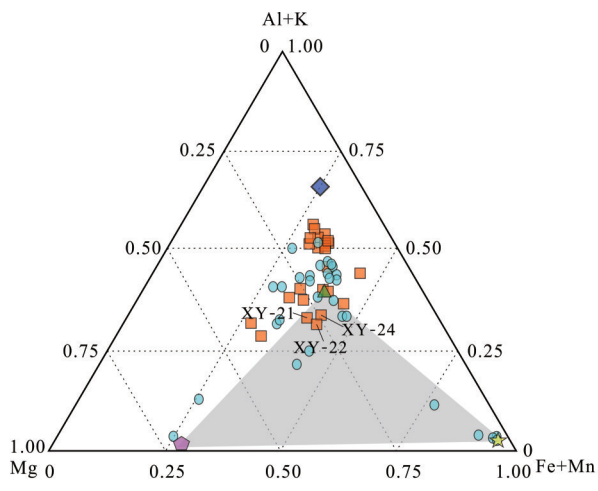


图3 研究区域内 Si/Ti-Al/Ti (a) 和 Al/Ti-Zr/Ti (b) 图解

●:本次研究;◆:大陆上地壳;■:南海东北部泥质沉积;▲:西南印度洋中脊玄武岩
Fig.3 Diagram of (a) Si/Ti-Al/Ti, and (b) Al/Ti-Zr/Ti in the study area

●:This study; ◆:Upper continental crust; ■:Mud deposits in the northeastern South China Sea; ▲:Southwest Indian Ocean Ridge basalt



图例

◆ SWIR橄榄石斑晶 ▲ SWIR玄武岩 ★ SWIR热液沉积物
◆ 平均大陆上地壳 ■ 本次研究样品 ● Carlsberg Ridge沉积物

图4 (Al+K)-Mg-(Fe+Mn) 三端元模型图

Fig.4 (Al+K)-Mg-(Fe+Mn) tripartite model diagram

3.3 稀土元素的特征参数和配分模式

研究区域内稀土总量 $\sum REE$ 在 $(14.52\sim 61.56) \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 28.71×10^{-6} (表5),远低于大陆上地壳的稀土总量^[15],略低于研究区内洋中脊玄武岩^[20],略高于N型洋中脊玄武岩(N-MORB)的稀土元素^[26],明显高于同研究区内的热液沉积^[20]。 $\sum LREE/\sum HREE$ 值在 1.43~9.53 之间,平均值为 4.66,除了个别样品(XY01的 $\sum LREE/\sum HREE$ 值为 9.53),总体上样品的轻重稀土分馏程度明显低于大陆上地壳,但高于热液沉积和洋中脊玄武岩。 δCe 的变化范围在 0.53~1.93 之间,平均值为 0.76; δEu 的变化范围在 0.94~1.35 之间,平均值为 1.07,指示除了个别样品,总体上呈明显的Ce负异常,而Eu异常不明显。样品的这些稀土元素特征参数与大陆上地壳、研究区内的玄武岩、热液沉积相比,往往某个参数比较接近,但其他参数又相差较大,指示稀土元素可能具有多

表5 稀土元素的特征参数
Table 5 Characteristic parameters of rare earth elements

| 特征参数 | | $\Sigma \text{REE}(\times 10^{-6})$ | $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ | δCe | δEu | 数据来源 |
|-----------|-----|-------------------------------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 本研究样品 | 最大值 | 61.56 | 9.53 | 1.91 | 1.35 | 本研究 |
| | 最小值 | 14.52 | 1.43 | 0.53 | 0.94 | |
| | 平均值 | 28.71 | 4.66 | 0.76 | 1.07 | |
| SWIR 玄武岩 | | 60.63 | 1.98 | 1.15 | 1.44 | 王振波等 ^[20] |
| N-MORB | | 39.11 | 1.32 | 0.88 | 1.49 | 韩宗珠等 ^[26] |
| UCC | | 148.14 | 9.33 | 0.98 | 1.09 | Rudnick <i>et al.</i> ^[15] |
| SWIR 热液沉积 | | 4.36 | 2.99 | 0.52 | 8.1 | 王振波等 ^[20] |

源性,其他不同来源的稀土元素分馏特征掩盖了研究区域内的热液影响。

样品的稀土元素 PAAS 配分模式见图 5,整体上呈 LREE 左倾 HREE 相对平缓的特点,与 N 型洋中脊玄武岩相似,表明样品的稀土元素与下伏的玄武岩存在密切关联。但是除了 XY22 和 XY24 样品,大部分样品均与 N 型洋中脊玄武岩的 Ce 异常有明显差异。

其中 XY23 和 XY25 有明显的 Ce 正异常,并且 XY25 稀土元素配分模式表现为右倾,说明不同样品之间 Ce 的分馏特征有较大差异。一般认为,氧化还原环境的改变,如深海底层流的改造作用可能加大 Ce 负异常;沉积物中混入 Mn 微结核之类颗粒也可导致 Ce 正异常。鉴于研究区为大洋中脊的地质背景,不太可能发育锰微结核,同时有研究指出西南印度洋中脊玄武岩 δCe 值大于 1^[20],因此推测 XY23 和 XY25 这两个样品主要继承了下伏玄武岩的 δCe 特征,受底层流的改造作用较小。典型的热液流体及热液沉积通常具有较高的 Eu 正异常,本次研究中个别样品 XY21-XY24 存在一定程度的 Eu 异常,但异常程度明显低于研究区内的热液沉积,而更接近于其

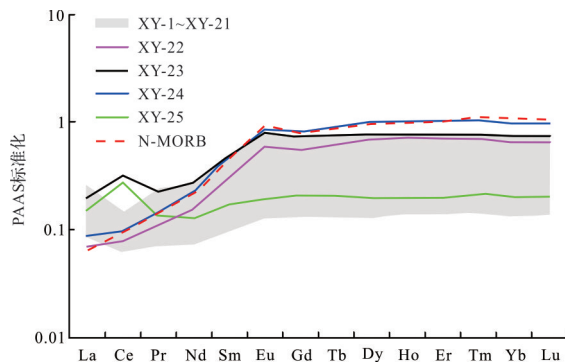


图5 研究样品 PAAS 配分模式 (PAAS 数据参考^[13])

Fig.5 REE concentration for the Mariana Trough normalized to shale and plotted versus atomic number

下伏玄武岩(表5),因此,可能更多的是继承了其下伏玄武岩的 Eu 异常特征,而沉积物沉积过程中(或者沉积期后)热液组分输入的迹象并不显著。

4 结论

本次研究经过对沉积物中主量、微量和稀土元素的地球化学特征分析,探讨了研究区域内沉积物可能的物质来源,以判断沉积物中可能的热液活动迹象。研究表明:本次研究的 25 个表层沉积样品中的碎屑组分,可能同时接受了陆源物质和西南印度洋中脊玄武岩风化的共同作用,并且在局部区域内沉积物受陆源物质或玄武岩风化作用的影响,不同站位的影响程度存在着差异。局部区域,主要是 XY-21、XY-22 和 XY-24 站位的沉积物样品可能受较轻程度的热液影响。但是鉴于与下伏的玄武岩在稀土元素继承关系,这 3 个样品中可能存在的热液活动迹象还有待于进一步商榷。以往研究认为,稀土元素会随着热液流体的扩散从海水中进入热液沉积物,因此, $\Sigma \text{REE}/\text{Fe}$ 值随热液流体远离喷口而增加。XY21 和 XY22 这两个样品其 $\Sigma \text{REE}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 值分别为 3.92 和 4.01,因此这两个样品可能确实受到热液流体扩散的影响。虽然与 XY22 样品采样位置完全相同,XY24 样品的 $\Sigma \text{REE}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 值为 8.47,是 XY22 样品的 2 倍,并且稀土元素配分曲线与玄武岩几乎重合,因此判断 XY24 样品表现出来的热液特征极有可能仅是继承源岩。

由此可见,研究区域内表层沉积物内元素地球化学特征受到不同物质来源的深刻影响,在热液活动区域的部分沉积物样品中存在热液活动迹象,但是热液作用的影响程度和范围还需要更多的详细调查研究。

5 未来研究建议

1)建议根据西南洋中脊构造特点和热液硫化物形成的相关机制,开展详细勘察的空间采样测网布局研究;2)进一步深入开展区域地球化学详查等基础工作,构建热液活动指标体系,以有效示踪沉积物中的热液活动迹象。

参考文献(References)

- [1] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1155-1158.
- [2] Lupton J E, Baker E T, Massoth G J. Helium, heat, and the generation of hydrothermal event plumes at mid-ocean ridges [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(3): 343-350.
- [3] Sauter D, Cannat M, Meyzen C, et al. Propagation of a melting anomaly along the ultraslow Southwest Indian Ridge between 46° E and 52° 20'E: Interaction with the Crozet hotspot? [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179(2): 687-699.
- [4] 张涛,林间,高金耀. 90Ma以来热点与西南印度洋中脊的交互作用:海台与板内海山的形成[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2011, 41(6):760-772. [Zhang Tao, Lin Jian, Gao Jinyao. Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma: Implications on the formation of oceanic plateaus and intra-plate seamounts [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2011, 41(6): 760-772.]
- [5] 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.
- [6] Tao C H, Lin J, Guo S Q, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 2012, 40(1): 47-50.
- [7] Muller M R, Minshull T A, White R S. Segmentation and melt supply at the Southwest Indian Ridge [J]. *Geology*, 1999, 27(10): 867-870.
- [8] Sauter D, Mendel V, Rommevaux-Jestin C, et al. Focused magmatism versus amagmatic spreading along the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge: Evidence from TOBI side scan sonar imagery [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(10): Q10K09.
- [9] Cannat M, Rommevaux-Jestin C, Sauter D, et al. Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69° E) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B10): 22825-22843.
- [10] Meyzen C M, Toplis M J, Humler E, et al. A discontinuity in mantle composition beneath the Southwest Indian Ridge [J]. *Nature*, 2003, 421(6924): 731-733.
- [11] Seyler M, Cannat M, Mével C. Evidence for major-element heterogeneity in the mantle source of abyssal peridotites from the Southwest Indian Ridge (52° to 69° E) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(2): 9101.
- [12] Font L, Murton B J, Roberts S, et al. Variations in melt productivity and melting conditions along SWIR (70° E-49° E): Evidence from olivine-hosted and plagioclase-hosted melt inclusions [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(8): 1471-1494.
- [13] Sauter D, Patriat P, Rommevaux-Jestin C, et al. The Southwest Indian Ridge between 49° 15'E and 57° E: Focused accretion and magma redistribution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 303-317.
- [14] Georgen J E, Kurz M D, Dick H J B, et al. Low ³He/⁴He ratios in basalt glasses from the western Southwest Indian Ridge (10°-24° E) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206(3/4): 509-528.
- [15] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1-64.
- [16] 韦刚健,刘颖,邵磊,等. 南海碎屑沉积物化学组成的气候记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 1-4. [Wei Gangjian, Liu Ying, Shao Lei, et al. Climatic records in the major elements of the terrestrial detritus from the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 1-4.]
- [17] 任景玲,张经,刘素美. 以Al/Ti比值为地球化学示踪剂反演海洋古生产力的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(12): 1314-1320. [Ren Jingling, Zhang Jing, Liu Sumei. A review on aluminum to titanium ratio as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity [J]. *Advance in Earth Science*, 2005, 20(12): 1314-1320.]
- [18] 张俊,孟宪伟,王湘芹. 晚第四纪南海北部陆坡沉积物常量元素比值对气候变冷事件的指示意义 [J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 106-111. [Zhang Jun, Meng Xianwei, Wang Xiangqin. The record of major element ratios in Late Quaternary at northern slope of the South China Sea and its indicative significance on the cooling events [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 106-111.]
- [19] 刘广虎,李军,陈道华,等. 台西南海域表层沉积物元素地球化学特征及其物源指示意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 61-68. [Liu Guanghu, Li Jun, Chen Daohua, et al. Geochemistry of surface sediments in the Taixinan (southwestern Taiwan) sea area in the northeastern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 61-68.]
- [20] 王振波,武光海,韩沉花. 西南印度洋脊49.6°E热液区热液产物和玄武岩地球化学特征 [J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 64-73. [Wang Zhenbo, Wu Guanghai, Han Chenhua. Geochemical characteristics of hydrothermal deposits and basalts at 49.6° E the Southwest Indian Ridge [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(1): 64-73.]

- [21] 陶春辉,李怀明,金肖兵,等. 西南印度洋脊的海底热液活动和硫化物勘探[J]. 科学通报,2014,59(19):1812-1822. [Tao Chunhui, Li Huaiming, Jin Xiaobing, et al. Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the Southwest Indian ridge [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(19): 1812-1822.]
- [22] Yu Z H, Li H M, Li M X, et al. Hydrothermal signature in the axial-sediments from the Carlsberg Ridge in the Northwest Indian Ocean[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 173-181.
- [23] Cave R R, German C R, Thomson J, et al. 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.
- [24] Seyfried Jr W E, Bischoff J L. Low temperature basalt alteration by sea water: An experimental study at 70°C and 150°C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(12): 1937-1947.
- [25] 于淼,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. [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, 27(3): 497-508.]
- [26] 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,2012,42(9):69-76. [Han Zongzhu, Zhang He, Fan Dejiang, et al. The characteristic of geochemistry and genesis for Mafic and ultramafic rocks from the 50°E of Southwest Indian Ridge [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(9): 69-76.]

Elemental Geochemical Characteristics and Significance of Hydrothermal Signature in the Axial Sediments from the Southwest Indian Oceanic Ridge

ZHANG XiaoYu^{1,2,3}, TAO ChunHui^{1,4}, LIAO ShiLi⁴, ZHOU JianPing⁴, LI HuaiMing⁴, TENG GuoChao¹, HUANG DaSong¹

1. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Key Laboratory of Ocean Observation-Imaging Testbed of Zhejiang Province, Zhoushan, Zhejiang 316000, China

3. Ocean Academy, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316000, China

4. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: The exploration of hydrothermal sulfide resources in mid-ocean ridge zones is a critical challenge for the mining sector. In this study, 46 surface sediment samples were collected from the southwestern ultra-slow-spreading Indian Oceanic Ridge area. The sediment types were classified by mineralogical analysis, elemental measurement (including main, trace and rare earth elements) and the material sources of the sediments are discussed. The study showed that biogenic calcareous deposits are a common sediment type in this area; evidence of eolian input was found in some sediment samples with element geochemical characteristics. Signs of hydrothermal activity were observed in some samples near the Longqi hydrothermal areas. The study suggests that characteristics of REE fractionation using an Al+K-Mg-Fe+Mn triangular diagram was an effective indicator of hydrothermal activity. This study not only provides basic data reference for sulfide exploration in the Southwest Indian Ocean, but it is also a preliminary exploration of geochemical prospecting methods for submarine hydrothermal sulfide exploration.

Key words: Southwest Indian Ocean mid ridge; surface sediment; elemental geochemistry; hydrothermal activity