



冲绳海槽南段沉积物的元素赋存状态及其热液活动记录

叶凡凡, 曾志刚

States of element occurrence of sediments in the southern Okinawa Trough and its hydrothermal activity

YE Fanfan and ZENG Zhigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023022701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲绳海槽表层沉积物元素地球化学及其对物源和热液活动的指示

Elemental geochemistry of surface sediments in Okinawa Trough and its implications for provenance and hydrothermal activity

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 25

冲绳海槽海底热液区附近浮岩气孔充填沉积物中热液活动的地球化学记录

Geochemical records of hydrothermal activities in the sediment fillings within pumice's vesicles in the vicinity of a seafloor hydrothermal field in the Okinawa Trough

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 102

冲绳海槽南部海底热液活动区地形地貌特征及成因分析

Topographic features of the hydrothermal field and their genetic mechanisms in southern Okinawa Trough

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 12

冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用

Interaction between seafloor cold seeps and adjacent hydrothermal activities in the Okinawa Trough

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 23

冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示

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

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 69

沉积速率与基底蓄水层流体活动对冲绳海槽海底热流值的影响

INFLUENCES OF SEDIMENTATION RATE AND FLUID ACTIVITIES IN BASEMENT AQUIFERS ON SEAFLOOR HEAT FLOW IN OKINAWA TROUGH

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(2): 11



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

叶凡凡, 曾志刚. 冲绳海槽南段沉积物的元素赋存状态及其热液活动记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 160-172.

YE Fanfan, ZENG Zhigang. States of element occurrence of sediments in the southern Okinawa Trough and its hydrothermal activity[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 160-172.

冲绳海槽南段沉积物的元素赋存状态及其热液活动记录

叶凡凡¹, 曾志刚^{2,3,4,5}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

2. 中国科学院海洋研究所, 青岛, 266071

3. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了解冲绳海槽南部沉积物的元素赋存状态以及热液活动对沉积物中元素组成的影响, 对冲绳海槽南部沉积物岩芯 HOBAB4-S2 进行了全岩样及顺序提取分析, 探讨了该沉积物岩芯中 Al、Ti、K、Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Co、Ni 及稀土元素的赋存状态, 结果表明残留相与碳酸盐相是岩芯沉积物中元素的重要赋存形式, 典型的碎屑组分 Al、K、Ti 在残留相中比例极高。铁锰氧化物相和有机结合相中各元素含量均相对较低, 但在铁锰氧化物相中, 与热液活动相关的金属元素在岩芯的萃取比例及含量上随着深度变化具有一致性, 同时在 4 个层位出现了异常高值, 表明在该层位对应的时期出现了热液活动对元素组成的显著影响, 稀土元素总量变化上也可看出明显相同的变化趋势。沉积物的球粒陨石标准化稀土元素配分模式整体显示了轻稀土元素相对重稀土元素更富集的特征, 具有极其轻微的 Ce 正异常和明显的 Eu 负异常, 与南大西洋受热液活动影响较小的沉积物中铁锰氧化物相的配分模式类似, 表明其受到热液流体的影响, 是铁锰颗粒吸附海水与热液流体中稀土元素的结果。

关键词: 沉积物; 顺序提取; 元素赋存状态; 热液活动; 冲绳海槽

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023022701

States of element occurrence of sediments in the southern Okinawa Trough and its hydrothermal activity

YE Fanfan¹, ZENG Zhigang^{2,3,4,5}

1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

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

4. Laboratory for Mineral Resources, National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

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

Abstract: To understand the element occurrence states of sediments in the southern Okinawa Trough and the influence of hydrothermal activity on the elemental composition of the sediments, the whole-sample and sequential extraction of core HOBAB4-S2 from the southern Okinawa Trough were analyzed and the occurrence state of Al, Ti, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, and rare earth elements in the sediment core. The results show that the residual phase and carbonate phase are the important forms of elements in the sediments, and the typical clastic components Al, K, and Ti have a high proportion in the residual phase. The contents of elements in Fe-Mn oxide and organic bound phases are relatively low, but in the Fe-Mn oxide phase, the extraction rates and contents of metallic elements associated with hydrothermal activity in the cores are consistent with depth, and anomalously high values appear in four layers, indicating that the significant influence of hydrothermal activity on elemental compositions occurred in the corresponding period of the layer. The same trend can be seen in the total amount of rare

资助项目: 国家自然科学基金“西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213); 中国科学院战略性先导科技专项“热液/冷泉区岩浆物质贡献与流体化学过程”(XDB42020402); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700); 泰山学者工程专项(ts201511061)

作者简介: 叶凡凡(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地球化学和岩石学研究, E-mail: yeff@qdio.ac.cn

通讯作者: 曾志刚(1968—), 男, 研究员, 主要从事海底热液活动及成矿研究, E-mail: zgzheng@qdio.ac.cn

收稿日期: 2022-02-27; **改回日期:** 2023-04-07. 文凤英编辑

earth elements. The chondrite-normalized rare earth element distribution patterns of the sediments show evidence of light rare earth element enrichment relative to heavy rare earth elements, with very small positive Ce anomalies and obvious negative Eu anomalies. The case is similar to the distribution pattern of the Fe-Mn oxide phase of the sediments in the South Atlantic Ocean, showing that it was less affected by hydrothermal activity, but affected by hydrothermal fluids, which is the result of rare earth elements absorption by Fe-Mn particles in seawater and hydrothermal fluids.

Key words: sediments; sequential extraction; element occurrence states; hydrothermal activity; Okinawa Trough

冲绳海槽位于东海和琉球群岛之间, 具有过渡性地壳, 是菲律宾海板块向欧亚板块俯冲形成的处于张裂阶段的年轻弧后盆地^[1-7], 其与琉球海沟、琉球岛弧构成了完整的沟-弧-盆体系, 成为研究弧后扩张早期阶段的盆地演变、岩浆作用和壳幔过程的天然实验室, 也是了解弧后盆地的发生和发展、地幔物质熔融及岩浆起源的一个罕见的“窗口”^[8], 对于认识海洋环境演化过程、了解气候环境的变化情况等具有重要意义。同时海槽内发育第四纪以来巨厚的连续沉积层, 其保存并记录了陆源物质的输入、海平面变化、海洋环流等重要的沉积信息, 加之其位于陆地向海洋的过渡地带, 也是研究海陆相互作用及古环境变化的理想区域。特别是冲绳海槽南段是整个海槽中自全新世以来具最高沉积速率的地区^[9], 更成为了研究海洋环流和古气候演化的重要区域^[10]。

1984 年在冲绳海槽中部的伊平屋脊段发现海底热液活动以来^[11], 该区域便成为了中外学者研究热液活动的重点及热点地区。槽内火山和地震等构造活动剧烈, 具有独特的区别于其他成熟弧后盆地的基底岩石、构造环境, 发育着特殊的热液活动和成矿作用, 形成了特殊的类似于陆地上古代 Kuroko 型火山成因的块状硫化物矿床^[12]。不仅如此, 由于热液活动在冲绳海槽中段和南段广泛发育, 因此周围沉积物或多或少受到热液活动的影响, 易在热液喷口附近区域或在离热液活动区较远的周围形成近喷口含金属沉积物或远端含金属沉积物^[13-15], 这些热液沉积物在元素组成上明显区别于正常远洋沉积物, 主要以富集 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、As 等元素并亏损 Al 和 Ti 等元素^[16-18]为主要特征。热液活动与沉积物之间通过元素交换等地球化学过程形成了紧密的联系, 且海底热液区附近区域的热液沉积物是海底热液循环存在的证据, 同时也是研究海底热液系统形成与演化的重要窗口。

冲绳海槽作为一个热液活动发育的弧后盆地, 前人已进行了大量与热液活动相关的研究工作, 且主要集中于热液区地球物理特征、热液流体的物理化学性质、热液沉积物的矿物及地球化学特征、热

液多金属硫化物堆积体的矿物及地球化学特征、热液喷口附近生物群落和基底岩石的类型及矿物学、地球化学特征的研究^[8,12,19-33]。尽管如此, 对于冲绳海槽南段沉积物的研究主要聚焦于矿物和化学组成方面的研究, 缺少利用顺序提取法对沉积物分相态以进行元素赋存状态分析的相关研究。众所周知, 通过顺序提取法进行赋存状态研究可以提供更多的元素总量难以反映的沉积物源及环境等信息, 加之冲绳海槽南段构造活动较为频繁、沉积环境较为动荡以及多种来源沉积物混杂的特征导致了沉积物中的热液活动记录信号较弱。因此, 本文基于 Bayon^[34-35]、Chester^[36]、Gutjahr^[37] 等的顺序提取法实验, 对冲绳海槽南部沉积物岩芯样品进行顺序提取实验、常量和微量元素组成分析, 进而研究了沉积物中元素的赋存状态, 以探讨热液活动对沉积物的元素组成及赋存状态的影响, 寻找其中热液活动的沉积记录, 并评估热液活动对沉积物的元素地球化学贡献和赋存状态的影响。

1 地质背景

冲绳海槽位于欧亚板块与太平洋板块之间的汇聚带上, 是西太平洋活动大陆边缘的组成部分, 受菲律宾海板块俯冲形成^[38-39]。冲绳海槽的北段以日本的九州岛为界, 南段以中国的台湾岛为界, 整体呈向东南方向凸出的新月形, 总体走向为北东-南西向, 长约 1 200 km, 宽约 100~150 km。基于地形和构造演化的差异, Shinjo 等^[38]将冲绳海槽以 Tukara 和 Miyako 断层构造带为界分为北段、中段及南段。冲绳海槽的特征是高通量, 强烈的火山活动, 大量的断层发育, 较强的重力异常以及弱的负地磁异常, 存在基底凹陷和上地幔隆起^[40-41]。俯冲的菲律宾海板块在海槽中轴线以下约 150~200 km, 在海槽南轴线以下约 150 km^[42]。菲律宾海板块俯冲的速度在海槽南段约为 7 cm/a, 在海槽中段约为 5 cm/a^[43]。冲绳海槽南段地壳的厚度为 13~16 km, 向北逐渐增加, 最高可达 30 km, 中段地区的地壳厚度为 16~22 km^[1,44]。槽内广泛分布了来自周围大陆

和岛屿的厚层碎屑沉积物,以及与弧和弧后火山活动有关的火山碎屑沉积物^[26,45]。

2 材料与方法

本文研究的沉积物岩芯 HOBAB4-S2(长度 24°52'49.906"N、122°37'19.702"E,长度 477 cm,)位于冲绳海槽南段的唐印热液区和第四与那国热液区之间(图 1),取样水深 1505 m,由中国科学院海洋研究所“科学”号考察船于 2016 年 5 月使用重力取样器采集。该岩芯沉积物主要由深灰色泥组成,偶尔可见淤泥和细砂层。作者以 1 cm 间隔进行取样获得了 477 个样品,选取了 40 个层位的样品进行了全岩常量、微量元素组成测试,选取了 20 个层位的样品进行了顺序提取实验,顺序提取法流程参考了 Bayon^[34]和 Yu^[47]等改进的实验方法,并采用李康^[48]等的方法将沉积物分为碳酸盐相、铁锰氧化物相、有机结合相及残留相,并测定了各相的主量和微量元素组成。

样品处理及分析流程:首先,将沉积物样品放置烘箱中于 60℃ 下烘干 24 h。然后,取出用玛瑙研钵研磨成 200 目的粉末以备全岩分析测试。取 40 mg 粉末,加入特氟龙消解罐中,向其中加入 1.5 mL 浓氢氟酸和 0.5 mL 浓硝酸后,密封并放置加热板于 150℃ 加热 24 h。放凉至液体不会喷出,打开盖子将剩余液体加热蒸干,然后加入 1 mL 浓硝酸和 1 mL 超纯水,密封后继续放置于 150℃ 电热板上加热 24 h 至样品完全溶解,再加入超纯水定容至 40 g。主量元素含量的测试在青岛斯八达分析测试有限公司使用美国瓦里安公司 Vrian720ES 型 ICP-OES 完成,相对标准偏差 < 2%;微量元素含量的测试在青岛斯八达分析测试有限公司使用美国瓦里安公司 Varian820 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,相对标准偏差 < 5%。测试过程中采用 GBW07314、GBW07315、GBW07316 以及美国地质调查局玄武岩标准物质 BHVO-2 作为标准样品。残留相的消解步骤与沉积物全岩相同,碳酸盐相、铁锰氧化物相、有机结合相在经过顺序提取分离后,分别将其置于特氟龙消解罐中,加入 1.5 mL 浓氢氟酸和 0.5 mL 浓硝酸后,不封盖放置于 150℃ 电热板上加热蒸至近干,然后加入 1 mL 浓硝酸和 1 mL 超纯水,密封后继续放置于 150℃ 电热板上加热 12 h,冷却后加入超纯水转移至定容瓶中定容至 40 g。各相主量元素和微量元素组成的测定方法同沉积物全样。

3 结果

3.1 岩芯沉积物不同相态中各元素含量及萃取比例的分布特征

HOBAB4-S2 岩芯沉积物中主量及微量元素在各相态中的含量分布见图 2,由图可见岩芯沉积物中元素在四种相态中的分布极不均匀,Al、Ti、K 均表现为在残留相中的含量普遍高于其他相态。Fe 在残留相中的含量最高,其次是碳酸盐相,其在铁锰氧化物相及有机结合相中的含量均较低。Mn 在碳酸盐相中的含量明显高于其他相态。Cu 在有机结合相中的含量高于其他三相,Pb 在铁锰氧化物相中的含量高于其余相的,Zn、Co、Ni 在碳酸盐相中含量明显高于其他相态。Al、Ti、K 元素的总含量随岩芯深度变化不大,平均值分别为 20.0%、0.9%、4.2%,较海槽表层沉积物^[49]稍高。Fe 元素含量随深度变化也不大,其总含量平均为 16%,与海槽南段表层沉积物相比偏高。Mn 元素总含量相较于海槽表层沉积物偏低,平均为 0.48%。Cu、Zn、Pb 元素总含量均比海槽沉积物高很多,随深度变化较大,且随深度变化趋势相同。Co、Ni 元素总含量也较海槽沉积物更高,随深度变化不大,但变化趋势相同。

为进一步确定元素含量在各相态中的分布比例,采用元素在各相态中的含量与其在沉积物中的总含量之比,即用各相态的萃取比例作萃取比例分布图(图 3)。由图可见,几乎全部的 Al、K 和 Ti 都赋存于残留相中,尤其是 Al、Ti 在整个岩芯各层位沉积物中的萃取比例均在 90% 以上,而 K 的萃取比例稍低,但平均在 70% 以上,且含量随深度变化微弱,另有小部分进入碳酸盐相中,基本不赋存于有机结合相及铁锰氧化物相中。Fe 主要赋存于残留相,其平均萃取比例约为 50%,次要赋存相为碳酸盐相,平均萃取比例为 25%,另有少部分赋存在铁锰氧化物相与有机结合相中。Mn 主要赋存于碳酸盐相,萃取比例平均为 78%,且萃取比例随深度变化不大,而在其余三相中萃取比例均极低,特别是在有机结合相中,Mn 萃取比例很低,平均为 5%,在铁锰氧化物相中 Mn 萃取比例变化较为明显,但平均萃取比例也很低,约为 12%。

Cu 的赋存形态在不同的层位也具有较大的差异,整体上主要赋存于有机结合相中(51%),其次是碳酸盐相和残留相中,二者萃取比例基本相当,平均分别为 24% 和 19%。而铁锰氧化物相的萃取比

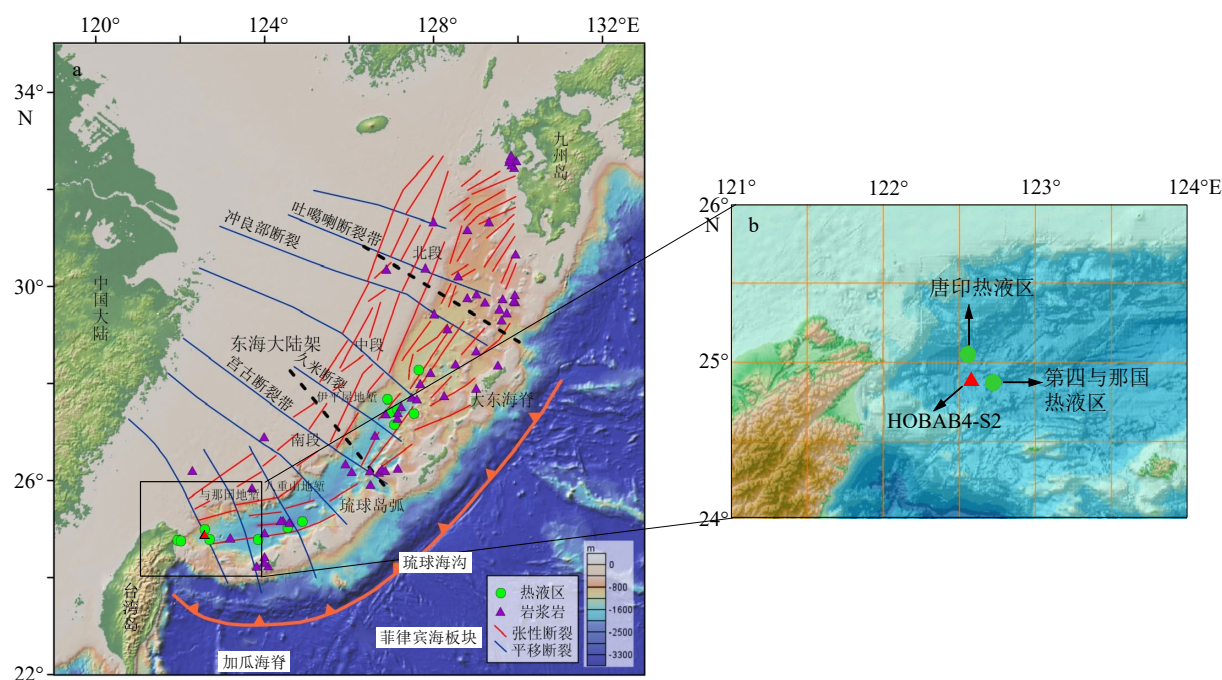


图 1 研究区构造地形图 (a) 及取样位置图 (b)

图 1a 底图引自文献 [46], 图 1b 底图数据来自 <https://www.gebco.net/>。

Fig.1 Tectonic topographic map of the study area (a) and sampling location (b)

Base map of 1a is from reference [46]; base map data of 1b from <https://www.gebco.net/>.

例很低, 平均只有 8%, 但在某些层位变化较大。Pb 的赋存状态较为特别, 其主要赋存于铁锰氧化物相与碳酸盐相, 且在铁锰氧化物相与碳酸盐相中的萃取比例随深度变化较大, 两者萃取比例变化趋势呈现相反的特征, 萃取比例的平均值分别为 42% 与 47%, 极少部分赋存于有机结合相与残留相中, 且在其中的平均萃取比例均低于 5%。

Zn 与 Co、Ni 元素的萃取比例分布很相似, 均主要赋存于碳酸盐相中, 平均萃取比例分别为 33%、58%、47%, 这 3 个元素中 Co 在碳酸盐相中的平均萃取比例最高。Co 元素有少部分进入除碳酸盐相的其余三相中, 且萃取比例随深度变化微弱。Zn 和 Ni 元素的次要存在相均为残留相, 在残留相中的萃取比例平均分别为 28% 和 34%, 且 Zn 元素在残留相中萃取比例的变化较 Co 元素的变化大。

综上所述, 在铁锰氧化物相与有机结合相中大部分金属元素含量较低甚至缺乏, 除 Cu 大部分赋存于有机结合相中, Pb 大部分赋存于铁锰氧化物相中之外, 大部分元素在铁锰氧化物相及有机结合相中的萃取比例均较低, 在铁锰氧化物相中的萃取比例均低于 26%, 在有机结合相中的萃取比例均低于 25%。整体上看, 各元素赋存状态极不均匀。除 Al、Ti 外, 其余元素在碳酸盐相中均有所赋存, 尤其以 Mn、Co 在该相中占比最高, 其余元素占比的平

均值均高于 30%。除 Al、Ti、K 外其余元素在铁锰氧化物相中均有存在, 但所占比例不高, 除 Pb 外萃取比例均较低。除 K、Mn、Pb 有极少量存在于有机结合相中外, 其余元素在有机结合相中均有存在, 但所占比例均不高, 除 Cu 在该相中萃取比例较高外其余元素在该相中萃取比例均较低。除 Mn、Pb 有极少量存在于残留相中外, 其余元素在残留相中均有存在, Al、Ti、K、Fe、Ni 均在残留相中占主要优势。

残留相是所研究的主量元素中最主要的赋存形式, 除 Mn 以外, 残留相中各元素的含量及萃取比例一般均高于其余相态, 尤其以 Al、Ti 最为典型, 元素含量 93% 以上均赋存于残留相中。残留相中主要包括碎屑硫酸盐、铝硅酸盐和少量难溶硫化物或难溶有机质^[50]。因此岩芯沉积物中多种元素主体赋存于残留相中的特征反映了这些元素在沉积物中主要以碎屑硅酸盐形式赋存, 同时也反映了该区陆源或火山碎屑形式的供给对沉积物的元素聚集有着重要贡献。这与前人在该区的研究结果相一致^[49]。

碳酸盐相是岩芯沉积物中元素的另一主要赋存形态, 除 Al、Ti 之外其余元素在该相态中均有所赋存, 且表现出岩芯沉积物该相态中 K、Cu、Zn、Pb 的元素含量与萃取比例变化趋势一致的特征, 在

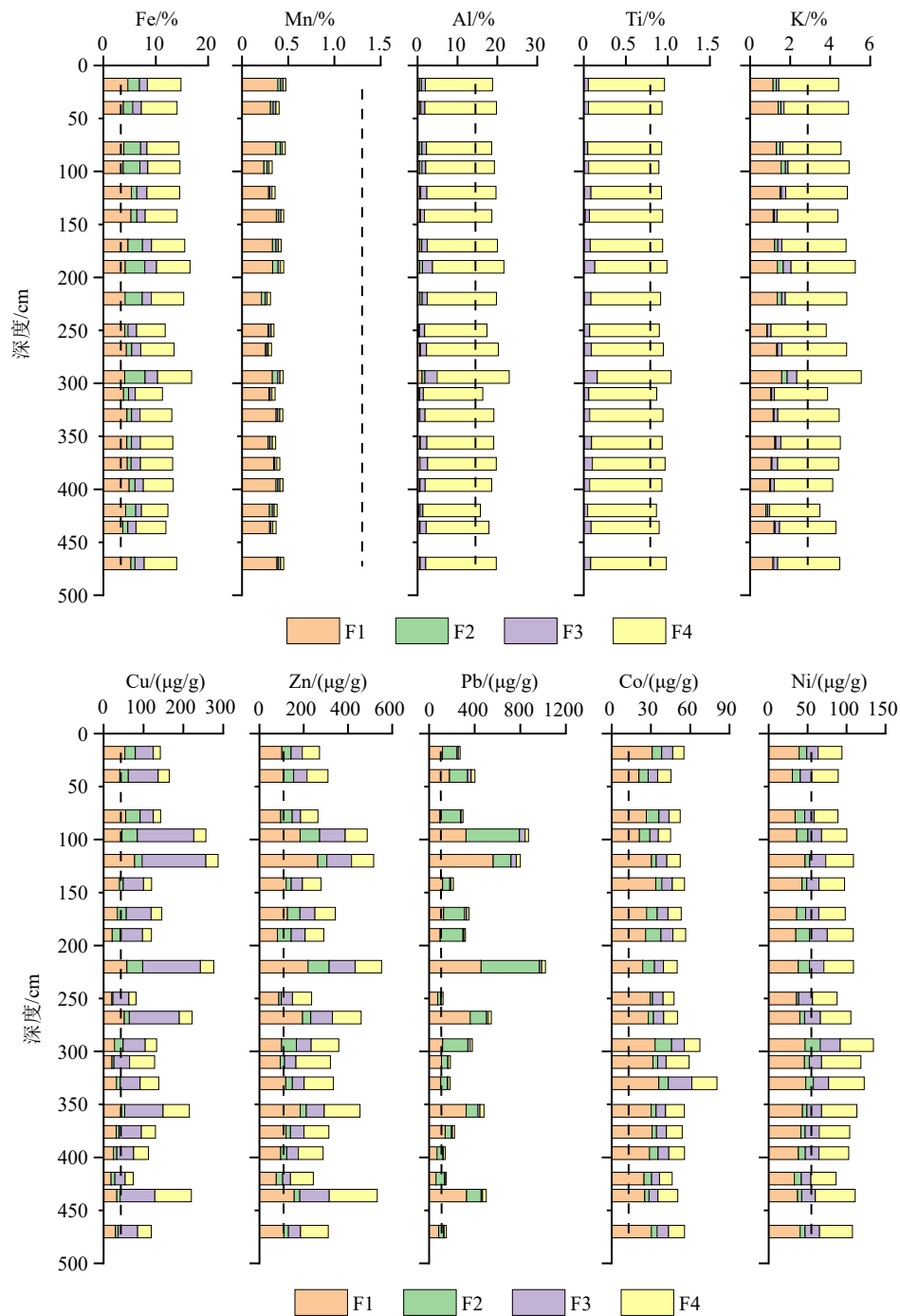


图2 岩芯沉积物中元素在各相态中含量的分布

F1-碳酸盐相, F2-铁锰氧化物相, F3-有机结合相, F4-残留相(下同)。虚线表示冲绳海槽南部表层沉积物元素丰度, 数据引自文献[49]。

Fig.2 Distribution of elemental contents of various phase states in core sediments

F1: carbonate phase, F2: Fe-Mn oxide phase, F3: organic bound phase, F4: residual phase (same below). The dashed line indicates the elemental abundance of surface sediments in the southern of the Okinawa Trough. Data are obtained from reference [49].

该相态中 Fe、Mn、Co、Ni 元素的含量与萃取比例变化趋势呈大致相同的特征。

值得注意的是, 除 Al、Ti、K 外其余的金属元素在铁锰氧化物相中的萃取比例随深度变化趋势相同, 且在该相态中 Cu、Zn、Pb、Co、Ni、Fe、Mn 元素的含量随深度变化趋势一致同时与萃取比

例随深度变化情况基本相同(图4、图5)。可见 Cu、Zn、Pb、Co、Ni、Fe、Mn 元素的萃取比例在 78、190、294、420 cm 层位处出现高值(图4、图5)。Pb 在铁锰氧化物相中的萃取比例变化范围极大, 萃取比例最大可达 61%, 最低为 19%。Cu、Zn、Co、Fe 的萃取比例均在 30% 以内变化, Ni 和 Mn 的萃取

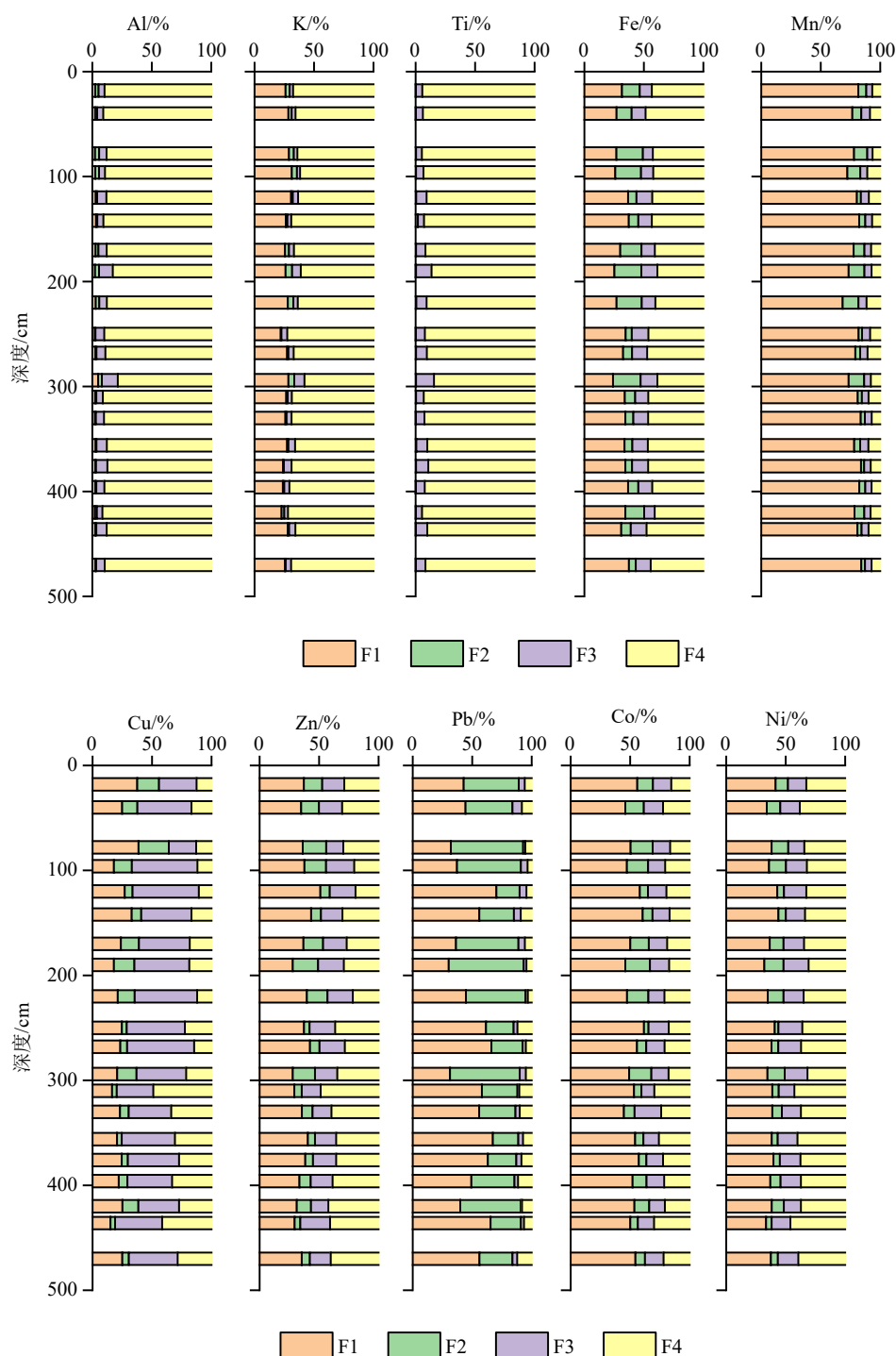


图 3 岩芯沉积物中各元素在不同相态中萃取比例的分布

Fig.3 Distribution of extraction ratios of elements in different phases in core sediments

比例相对较低且均在 20% 以内变化。Pb 的元素含量在岩芯铁锰氧化物相各层位中也是最高的, 同时变化范围也很大, 元素含量最高为 511 $\mu\text{g/g}$, 最低为 42 $\mu\text{g/g}$, 含量平均值为 150 $\mu\text{g/g}$ 。岩芯铁锰氧化物相中 Zn 的元素含量在 11~67 $\mu\text{g/g}$ 之间变化, 平均值为 41 $\mu\text{g/g}$ 。Cu 的元素含量变化范围是 3.3~40 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 16.7 $\mu\text{g/g}$ 。Ni 的元素含量变化区间为 2.8~19.6 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 9.4 $\mu\text{g/g}$ 。Co 的元素含

量变化范围为 1.8~12.6 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 6.3 $\mu\text{g/g}$ 。Fe、Mn 的含量在铁锰氧化物相中均较低, 其中 Fe 的元素含量变化范围为 0.6%~3.9%, 平均值为 1.8%。元素 Mn 的含量在铁锰氧化物相中最低, 变化范围为 0.01%~0.06%, 平均值为 0.03%。

3.2 岩芯沉积物的稀土元素地球化学特征

可以看出, 岩芯铁锰氧化物相中稀土元素总量

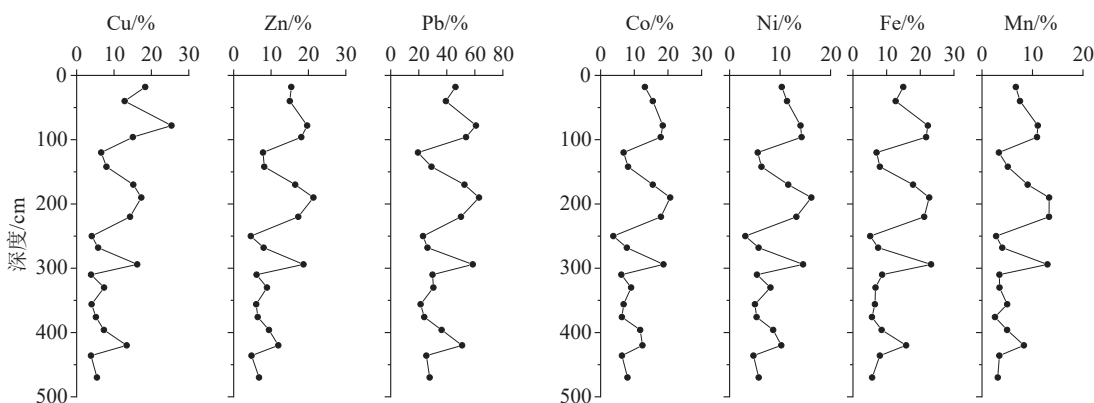


图 4 铁锰氧化物相中几种金属元素萃取比例随深度变化

Fig.4 Variation of extraction ratio of several metal elements in Fe-Mn oxide phase with depth

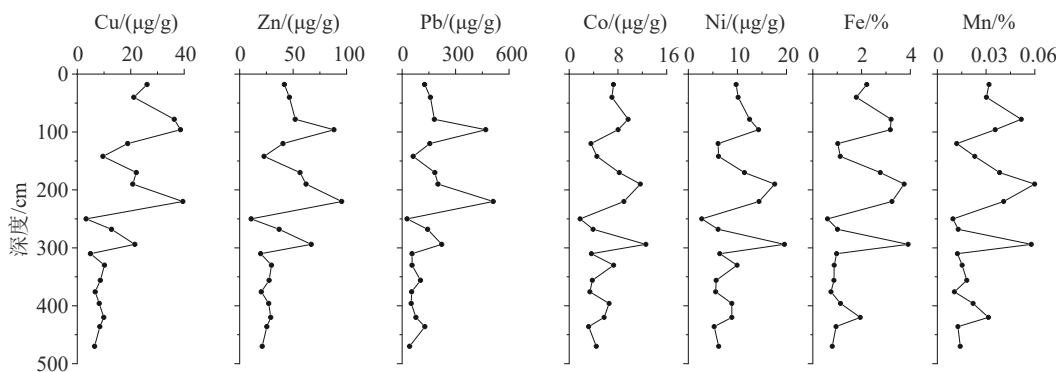


图 5 铁锰氧化物相中元素含量随深度变化

Fig.5 Variation of elemental content in Fe-Mn oxide phase with depth

随深度变化趋势与 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Co、Ni 元素在铁锰氧化物相中的萃取比例及含量随深度变化趋势一致(图 6), 稀土元素总量变化范围很大, 最低只有 15 $\mu\text{g/g}$, 最高达到 122 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 55.3 $\mu\text{g/g}$ 。轻稀土元素(La—Eu)变化范围为 12.8~104 $\mu\text{g/g}$, 平均值 46.9 $\mu\text{g/g}$ 。重稀土元素(Gd—Lu)总量变化范围为 2.4~18.1 $\mu\text{g/g}$, 平均值 8.4 $\mu\text{g/g}$ 。轻稀土元素与重稀土元素均表现为统一的含量变化趋势, 同时该相态中轻稀土元素明显较重稀土元素富集。

岩芯各层位的铁锰氧化物相中稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 7)显示, 其整体上呈现右倾趋势, 具有明显 Eu 负异常(δEu 平均为 0.67), 轻微 Ce 正异常(δCe 平均为 1.07), 各个层位中铁锰氧化物相的稀土元素球粒陨石标准化配分模式大体一致, 该特征与南大西洋受热液活动影响较小的沉积物^[52]的铁锰氧化物相的稀土元素球粒陨石标准化配分模式相似($\delta\text{Eu}=0.71$, $\delta\text{Ce}=1.60$), 相较于南大西洋受热液活动影响较小的沉积物没有较为明显的 Ce 正异常, Eu 的负异常则较为相似。

$$\delta\text{Eu} = \frac{\text{Eu}_N}{\sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}}, \quad \delta\text{Ce} = \frac{\text{Ce}_N}{\sqrt{\text{La}_N \times \text{Pr}_N}}$$

由稀土元素在铁锰氧化物相和残留相中的萃取比例分布(图 8), 可以看出稀土元素在铁锰氧化物相中的萃取比例在 10%~30% 之间, 稀土元素萃取比例平均值低于 20%。而在残留相中, 基本上所有稀土元素的萃取比例明显高于 30%, 个别稀土元素萃取比例可达 70% 以上, 平均萃取比例为 44%, 对比发现稀土元素主要赋存于残留相中。所有的稀土元素均显示了同一变化趋势, 反映了其极为相似的地球化学性质。

4 讨论

前人的研究认为, 铁锰氧化物通过对周围水体中元素的清扫作用, 可以从周围海水捕获大量元素, 同时通过前人对冲绳海槽中段热液区附近沉积物的顺序提取分析的研究可知, 铁锰氧化物结合态是热液源组分在沉积物中的主要赋存形式^[47]。冲绳海槽南段热液活动发育, 岩芯沉积物周围有唐印

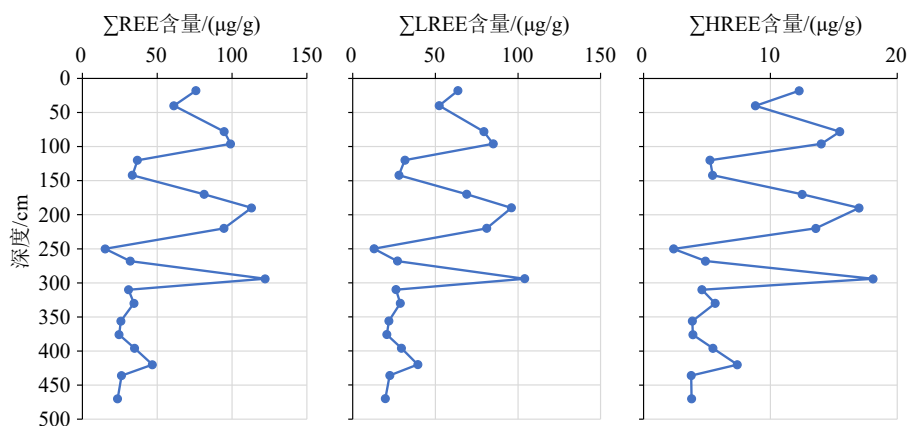


图 6 铁锰氧化物相中稀土元素总量随深度变化

Fig.6 Variation of total rare earth elements in Fe-Mn oxide phase with depth

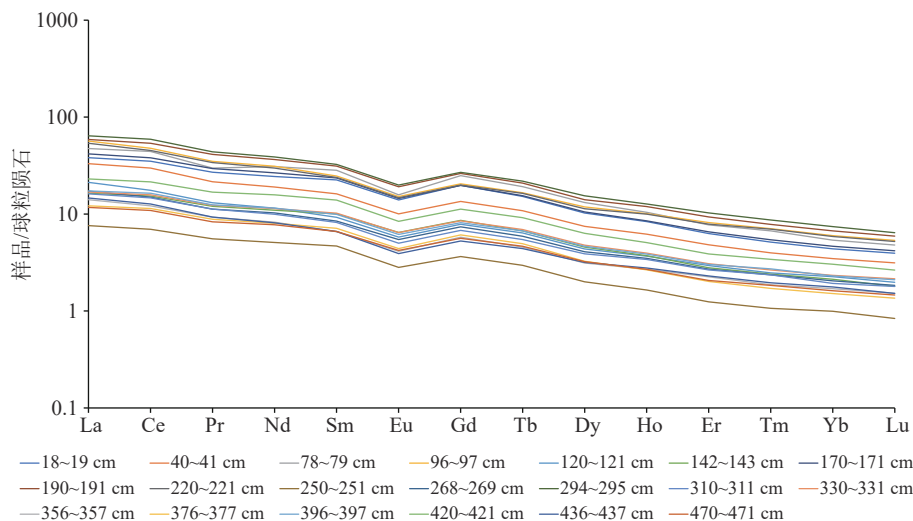


图 7 铁锰氧化物相稀土元素球粒陨石标准化配分模式

球粒陨石标准化值数据引自文献 [51]。

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns in the Fe-Mn oxide phase

Normalization values are from reference [51].

热液区与第四与那国热液区, 岩芯沉积物的取样位置距离东南部的第四与那国热液活动区大约 10 km, 距离西北部的唐印热液区大约 20 km, 岩芯沉积物取自于唐印热液区和第四与那国热液区之间(图 1), 指示了样品中很可能有热液来源物质的加入, 因此推测岩芯在 78、190、294、420 cm 层位处的沉积物经历了热液活动的影响, 并且改变了该层位沉积物中元素的赋存状态, 从而影响岩芯沉积物整体的元素富集形式。对于唐印热液区的研究表明, 热液羽流会在洋流作用下向南或东南方向迁移扩散^[53]。深海沉积物中的热液组分主要通过两种方式形成: (1) 热液物质从中性浮力羽流中扩散和沉降以及热液的横向扩散形成广泛分布的高 Fe(20.01%~39.33%)、Mn(4.00%~13.65%) 含量的热液沉积物^[17,54-56], (2) 在喷口附近形成的硫化物的

大规模冲刷和侵蚀。前人的研究表明, 热液羽流中的颗粒大小不超过 70 μm ^[18], 其中大多数颗粒的直径都小于 2 μm , 而硫化物颗粒的粒度大于 63 μm , 同时 HOBAB4-S2 岩芯中的 Fe(2.66%~4.72%)、Mn(0.04%~0.05%) 含量均低于由热液羽流扩散形成的热液沉积物的 Fe、Mn 含量, 因此可以认为热液活动形成的硫化物颗粒会通过热液羽流的迁移和输送而在距离热液喷口的远端剧烈沉降海底沉积。唐印热液区的热液沉淀物中富含 Fe、Zn、Pb 及自然硫, 含金属沉积物中富含黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和少量磁黄铁矿。第四与那国热液区中的硫化物主要包括闪锌矿和少量黄铁矿、黄铜矿。黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿中富含 Fe、Cu、Zn、Pb, 而 Yang 等^[57] 在岩芯沉积物中观察到了黄铁矿、方铅矿、黄铁矿和少量闪锌矿, 其组成与唐

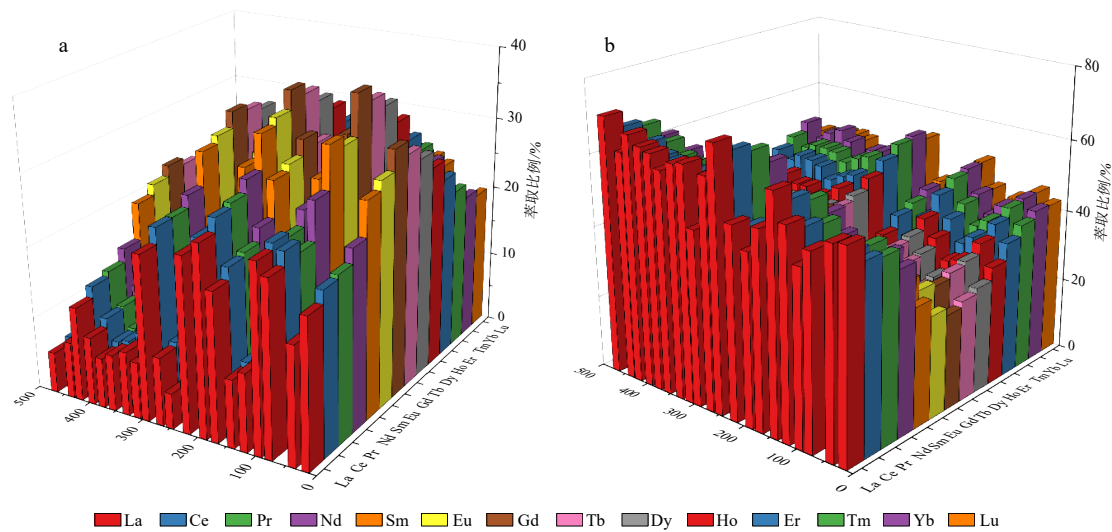


图 8 铁锰氧化物相 (a) 和残留相 (b) 中稀土元素萃取比例分布图

Fig.8 Distribution of extraction ratio of rare earth elements in Fe-Mn oxide phase (a) and residual phase (b)

印热液区硫化物更为相似因此认为热液组分来源于唐印热液区。因此可以确定沉积物受热液活动影响,且可能同时接受了来自唐印热液区及第四与那国热液区的热液硫化物的贡献,使 Fe、Cu、Zn、Pb 等元素在铁锰氧化物相中的含量及萃取比例在几个层位的明显偏高。通过浮游有孔虫的挑选及 AMS ¹⁴C 测年,测年结果通过 Calib7.1 软件校正后显示岩芯沉积物底部沉积年龄为 624 aBP^[58]。Fujiwara 等^[59]从第四与那国热液区的热液硫化物矿床中提取的重晶石进行电子自旋共振(ESP)年龄研究时,发现取自活动的热液喷口烟囱体的样品年龄为 580~990 aBP,来自活动的热液喷口的样品显示出较轻的年龄为 200~260 aBP,均表明第四与那国热液区范围内近 1 000 年来发生过频繁的热液活动现象,因此沉积物岩芯沉积过程中受到频繁的热液活动影响是极为可能的。通过逐次线性内差法对表 1 中的年代学数据进行计算,发现本次研究中的 4 个受到热液活动影响的层位沉积年代分别为 99、

187、312、448 aBP。

Hsu^[60]等运用顺序提取法对冲绳海槽南段的热液活动区和非热液活动区沉积物中 Fe、Mn、Al 等元素进行对比研究,同样发现受热液活动影响的沉积物在铁锰氧化相中的 Fe、Mn 元素萃取比例比非热液影响的沉积物的萃取比例高,尤其是 Mn 的变化更为明显,而 Al 萃取比例则很低,亦变化不大。而与之不同的是,本次顺序提取分析中 Pb 在铁锰氧化物相的萃取比例变化最大,其萃取比例最高可达 62%,最低只有 18%,这可能是沉积物中热液来源的硫化物中方铅矿含量较高且热液活动强度的变化所导致的。

通过对海槽南部第四与那国热液流体稀土元素的研究发现,随着流体喷出海底与海水的混合及扩散,流体中的正 Eu 异常越弱,而负 Ce 异常明显增加^[61]。流体中溶解的 Fe²⁺被氧化为氧化物或氢氧化物迅速沉积下来,而热液柱中的 Fe 氧羟化物则对热液流体及周围海水的稀土元素均具强烈的清扫作用。热液柱中 Fe-Mn 颗粒物的快速沉积及其对热液柱和海水中稀土元素的强烈清扫作用会对下覆沉积物中的稀土元素组成产生影响^[62]。热液柱中也会携带一些硫化物或硫酸盐颗粒,这些颗粒物及 Fe-Mn 氧羟化物沉降到下覆沉积物中,也可能对下覆沉积物中的元素组成产生影响^[63]。在正常海水中 Ce³⁺易在氧化还原条件下被氧化成 Ce⁴⁺形成 CeO₂ 沉淀而使海水显示出明显的负 Ce 异常,而海洋自生作用形成的铁锰结核或结壳因吸附海水中的 Ce 及其他稀土元素,通常会表现出强烈的 Ce 正异常。因此 HOBAB4-S2 岩芯铁锰氧化物相态

表 1 HOBAB4-S2 岩芯碳同位素测年结果					
Table 1 Results of carbon isotope dating for HOBAB4-S2 cores					
深度/cm	材料	AMS ¹⁴ C 年龄/aBP	校正年龄/aBP		数据来源
			中间年龄	年龄范围/2σ	
74	浮游有孔虫	290±30	35	0~70	文献[58]
125		560±30	159	260~47	
283		690±30	304	424~230	
387		730±30	346	432~268	
477		1 090±30	624	682~541	

中出现非常轻微的 Ce 正异常, 可以认为是热液活动形成的热液柱中的 Fe-Mn 氧化物等颗粒物对周围海水及热液柱中稀土元素的清扫, 或者是受海水的影响加强所导致的。热液柱中的 Fe-Mn 颗粒物沉降到下覆沉积物后, 会不断改变沉积物的 REE 配分模式, 使沉积物的 Ce 出现正异常, 出现类似于水成型铁锰结壳的 REE 配分模式, 且同时由于铁锰氧化物对热液流体中稀土元素的清扫, 沉积物铁锰氧化物相中的稀土元素球粒陨石标准化配分模式显示了热液流体中的轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损的特征, 而其显示的 Eu 负异常与热液流体的强烈正异常明显区别, 可能是距离热液喷口较远, 热液流体离开喷口后形成的热液柱随着其远离热液喷口向远处扩散迁移时会逐渐显示海水的稀土元素特征^[15,24], 同时被铁锰氧化物吸附海水中的稀土元素, 这与该区沉积环境动荡、沉积物组成以陆源物质为主掩盖了部分热液活动信息以及该区较快的沉积速率有极大的关系。

众所周知, Cu 与有机质如海藻等微生物分解的腐殖酸、代谢物具有很强的络合或生物化学反应能力, 因此 Cu 在有机结合相中的高萃取比例表明有机质对 Cu 有着较强的吸附络合作用。而 Pb 主要赋存于铁锰氧化物相, 表明热液活动产生的硫化物中方铅矿含量较高, 对 Pb 的元素含量贡献较大。除陆源元素 Al、Ti 外的其余元素均在碳酸盐相有所赋存, Mn 是碳酸盐相中萃取比例最高的元素, 表明生物作用是本区的 Mn、Co 等金属元素进入沉积物的主要机制, Mn 在碳酸盐相的萃取比例极高与生物化学作用形成的自生组分如锰结核有关。除典型的陆源代表元素 Al、Ti、K 外的金属元素在铁锰氧化物相均有存在但所占比例不大, 则表明热液活动对这些元素均有一定的贡献。除 Cu 外的其他元素在有机结合相中的萃取比例明显较低, 表明元素与有机质活性基团或硫离子结合的作用较低, 与之对应的有机质对于各元素的吸附能力较弱。Mn、Pb 在残留相中占比极低, Al、Ti、K、Fe、Ni 均在残留相中占主要优势, 由于 Al 可能以硅酸盐结晶矿物的形式存在, Ti 可能以类质同相替代而存在于黏土矿物中, K 可能以长石的形式存在, 而残留相中的金属元素主要存在于黏土、长石、石英等硅酸盐矿物晶格中, 因此, 残留相中的元素主要来源于陆源碎屑中的硅酸盐、铝硅酸盐矿物。

由铁锰氧化相和残留相中的稀土元素萃取比例对比, 发现稀土元素主要赋存于残留相中, 即残留相中赋存的陆源稀土元素明显高于铁锰氧化物

相中的热液源稀土元素在沉积物总稀土元素含量中的占比, 热液源的稀土元素对于沉积物中总的稀土元素的贡献并不占主导地位, 而残留相中难溶的陆源碎屑物质本身存在的稀土元素或在沉积过程中进一步吸收周围海水中的稀土对于沉积物总的稀土元素贡献占明显优势。赋存于铁锰氧化物相中的热液源稀土元素总量较低且由于距离热液喷口较远而受热液活动的影响较小, 而本身存在于热液来源硫化物中的 Fe、Cu、Zn、Pb、Mn 则主要赋存在铁锰氧化物相中, 因此各元素含量及萃取比例在铁锰氧化物相中的变化程度受热液活动强度变化的直接影响较大。

5 结论

(1) 对冲绳海槽南部岩芯沉积物进行了顺序提取分析, 结果表明残留相是该岩芯沉积物中元素 Fe、Mn、Al、Ti、K、Cu、Zn、Pb、Co、Ni 的最主要赋存态, 碳酸盐相是次要赋存态, 表明陆源碎屑沉积与生物碳酸盐沉积是该区的主要沉积作用方式, 陆源物质与生源物质占沉积物来源的主导地位。

(2) 与热液活动相关的 Cu、Zn、Pb、Fe、Mn 等金属元素在铁锰氧化物相中的萃取比例与其含量以及稀土元素总量随深度变化趋势相同, 且在 4 个层位出现异常高值, 结合前人对于周围热液区的热液喷口喷发周期资料分析, 认为热液活动对沉积物中元素组成及赋存状态有显著影响。

(3) 岩芯铁锰氧化物相的稀土元素球粒陨石标准化配分模式显示了极轻微的 Ce 正异常和明显的 Eu 负异常, 以及轻稀土元素较重稀土元素更为富集的特征, 这与南大西洋受热液活动影响较小的沉积物铁锰氧化物相的稀土元素配分模式类似, 是热液柱中的铁锰氧化物吸附海水及热液柱中的稀土元素, 且该处岩芯沉积物距离热液活动区较远、受热液活动影响较小所致。

致谢: 对中国科学院海洋研究所“科学号”考察船所有船上队员为采集样品、数据和资料所做出的贡献表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Sibuet J C, Letouzey J, Barbier F, et al. Back arc extension in the Okinawa trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92 (B13): 14041-14063.

- [2] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin [J]. *Lithos*, 2000, 54 (3-4): 117-137.
- [3] Lee C S, Shor Jr G G, Bibee L D, et al. Okinawa Trough: origin of a back-arc basin [J]. *Marine Geology*, 1980, 35 (1-3): 219-241.
- [4] Kimura M. Back-arc rifting in the Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2 (3): 222-240.
- [5] Letouzey J, Kimura M. The Okinawa Trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin [J]. *Tectonophysics*, 1986, 125 (1-3): 209-230.
- [6] 翟世奎, 陈丽蓉, 王镇, 等. 冲绳海槽浮岩岩浆活动模式浅析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17 (1): 59-66. [ZHAH Shikui, CHEN Lirong, WANG Zhen, et al. Primary analysis on pumice magmatism model of the Okinawa Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17 (1): 59-66.]
- [7] 黄朋, 李安春, 蒋恒毅. 冲绳海槽北、中段火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22 (6): 1703-1712. [HUANG Peng, LI Anchun, JIANG Hengyi. Geochemical features and their geological implications of volcanic rocks from the northern and middle Okinawa Trough [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (6): 1703-1712.]
- [8] Zhang Y J, Zhai S K. Magma evolution processes in the southern Okinawa trough: insights from melt inclusions [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20 (6): 1383-1397.
- [9] Chung Y, Chang W C. Pb-210 fluxes and sedimentation rates on the lower continental slope between Taiwan and the South Okinawa Trough [J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15 (2-3): 149-164.
- [10] Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary [J]. *Marine Geology*, 2008, 255 (1-2): 83-95.
- [11] Kimura M, Furukawa M, Izawa E, et al. Report on DELP 1988 Cruises in the Okinawa Trough. Part 7. Geologic investigation of the central rift in the middle to southern Okinawa Trough [J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1991, 66 (1): 179-209.
- [12] Halbach P, Pracejus B, Maerten A. Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa Trough, Japan [J]. *Economic Geology*, 1993, 88 (8): 2210-2225.
- [13] Rusakov V Y. Possible reasons for correlations between the concentrations of major and trace metals in metalliferous sediments [J]. *Geochemistry International*, 2010, 48 (3): 305-314.
- [14] Mills R A. Hydrothermal deposits and metalliferous sediments from TAG, 26°N Mid-Atlantic Ridge[M]//Parson L M, Walker C L, Dixon D R. *Hydrothermal Vents and Processes*. London: Geological Society, 1995: 121-132.
- [15] Dekov V M, Cuadros J, Kamenov G D, et al. Metalliferous sediments from the H. M. S. *Challenger voyage* (1872-1876) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74 (17): 5019-5038.
- [16] Dymond J, Corliss J B, Heath G R, et al. Origin of metalliferous sediments from the Pacific Ocean [J]. *GSA Bulletin*, 1973, 84 (10): 3355-3372.
- [17] Mills R, Elderfield H, Thomson J. A dual origin for the hydrothermal component in a metalliferous sediment core from the Mid - Atlantic Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1993, 98 (B6): 9671-9681.
- [18] Gurvich E G. *Metalliferous Sediments of the World Ocean: Fundamental Theory of Deep-Sea Hydrothermal Sedimentation*[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [19] Halbach P, Hansmann W, Köppel V, et al. Whole-rock and sulfide lead-isotope data from the hydrothermal JADE field in the Okinawa back-arc trough [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32 (1): 70-78.
- [20] Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al. Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid - Okinawa Trough Backarc Basin [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17 (12): 2133-2136.
- [21] Glasby G P, Notsu K. Submarine hydrothermal mineralization in the Okinawa Trough, SW of Japan: an overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23 (3-4): 299-339.
- [22] Hongo Y, Obata H, Gamo T, et al. Rare earth elements in the hydrothermal system at Okinawa Trough back-arc basin [J]. *Geochemical Journal*, 2007, 41 (1): 1-15.
- [23] Ishibashi J I, Ikegami F, Tsuji T, et al. Hydrothermal activity in the Okinawa Trough back-arc basin: geological background and hydrothermal mineralization[M]//Ishibashi J I, Okino K, Sunamura M. *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*. Tokyo: Springer, 2015: 337-359.
- [24] Gena K, Chiba H, Kase K, et al. The tiger sulfide chimney, Yonaguni knoll IV hydrothermal field, southern Okinawa trough, Japan: the first reported occurrence of Pt-Cu-Fe - bearing bismuthinite and Sn - bearing chalcopyrite in an active seafloor hydrothermal system [J]. *Resource Geology*, 2013, 63 (4): 360-370.
- [25] Suzuki R, Ishibashi J I, Nakaseama M, et al. Diverse range of mineralization induced by phase separation of hydrothermal fluid: case study of the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field in the Okinawa Trough Back - Arc Basin [J]. *Resource Geology*, 2008, 58 (3): 267-288.
- [26] Yeats C J, Hollis S P, Halfpenny A, et al. Actively forming Kuroko-type volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) mineralization at Iheya North, Okinawa Trough, Japan [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 20-41.
- [27] Xu Z K, Li T G, Chang F M, et al. Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 236-245.
- [28] Yan Q S, Shi X F. Petrologic perspectives on tectonic evolution of a nascent basin (Okinawa Trough) behind Ryukyu Arc: a review [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33 (4): 1-12.
- [29] Yang B J, Liu J H, Shi X F, et al. Mineralogy and sulfur isotope characteristics of metalliferous sediments from the Tangyin hydrothermal field in the southern Okinawa Trough [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103464.
- [30] Zeng Z G, Ma Y, Chen S, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems: implications for ore genesis and fluid circulation [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87: 155-171.
- [31] Zeng Z G, Ma Y, Wang X Y, et al. Elemental compositions of crab and

- snail shells from the Kueishantao hydrothermal field in the southwestern Okinawa Trough [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 90-101.
- [32] Zeng Z G, Chen S, Ma Y, et al. Chemical compositions of mussels and clams from the Tangyin and Yonaguni Knoll IV hydrothermal fields in the southwestern Okinawa Trough [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87: 172-191.
- [33] Zhang X, Zhai S K, Yu Z H, et al. Mineralogy and geological significance of hydrothermal deposits from the Okinawa Trough [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 124-131.
- [34] Bayon G, German C R, Boella R M, et al. An improved method for extracting marine sediment fractions and its application to Sr and Nd isotopic analysis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187 (3-4): 179-199.
- [35] Bayon G, German C R, Burton K W, et al. Sedimentary Fe-Mn oxyhydroxides as paleoceanographic archives and the role of aeolian flux in regulating oceanic dissolved REE [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224 (3-4): 477-492.
- [36] Chester R, Hughes M J. A chemical technique for the separation of ferro-manganese minerals, carbonate minerals and adsorbed trace elements from pelagic sediments [J]. *Chemical Geology*, 1967, 2: 249-262.
- [37] Gutjahr M, Frank M, Stirling C H, et al. Reliable extraction of a deep-water trace metal isotope signal from Fe-Mn oxyhydroxide coatings of marine sediments [J]. *Chemical Geology*, 2007, 242 (3-4): 351-370.
- [38] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr - Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1999, 104 (B5): 10591-10608.
- [39] Li N S. On tectonic problems of the Okinawa Trough [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19 (3): 255-264.
- [40] Zeng Z G, Yu S X, Wang X Y, et al. Geochemical and isotopic characteristics of volcanic rocks from the northern East China Sea shelf margin and the Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29 (4): 48-61.
- [41] Lai Z Q, Zhao G T, Han Z Z, et al. Back - arc magma processes in the Okinawa Trough: new insights from textural and compositional variations of plagioclase in basalts [J]. *Geological Journal*, 2016, 51 (S1): 346-356.
- [42] Sibuet J C, Deffontaines B, Hsu S K, et al. Okinawa trough Backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1998, 103 (B12): 30245-30267.
- [43] Arai R, Kodaira S, Yuka K, et al. Crustal structure of the southern Okinawa Trough: symmetrical rifting, submarine volcano, and potential mantle accretion in the continental back - arc basin [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2017, 122 (1): 622-641.
- [44] Liu B, Li S Z, Suo Y H, et al. The geological nature and geodynamics of the Okinawa Trough, Western Pacific [J]. *Geological Journal*, 2016, 51 (S1): 416-428.
- [45] Takai K, Mottl M J, Nielsen S H, et al. Proceedings of the integrated ocean drilling program [C]. Washington, DC: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc, 2011.
- [46] 胡思谊. 冲绳海槽南部S3岩心沉积物的矿物学和地球化学研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2020. [HU Siyi. Mineralogical and geochemical study of sediment core S3 from the southern Okinawa Trough[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2020.]
- [47] 于增慧, 高玉花, 翟世奎, 等. 冲绳海槽中部沉积物中热液源组分的顺序淋滤萃取研究[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 55 (3): 665-674. [YU Zenghui, GAO Yuhua, ZHAI Shikui, et al. Resolving the hydrothermal signature by sequential leaching studies of sediments from the middle of the Okinawa Trough [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55 (3): 665-674.]
- [48] 李康, 曾志刚, 殷学博, 等. 东太平洋海隆13°N和赤道附近表层沉积物中的元素赋存状态[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (3): 53-60. [LI Kang, ZENG Zhigang, YIN Xuebo, et al. Mode of element occurrence in surface sediments from East Pacific Rise near 13°N and the equator [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29 (3): 53-60.]
- [49] 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J]. 沉积学报, 2002, 20 (4): 680-686. [JIANG Fuqing, LI Anchun. Geochemical characteristics and their implications to provenance and environment of surface sediments from the South Okinawa trough [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20 (4): 680-686.]
- [50] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51 (7): 844-851.
- [51] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [52] 张颖, 杨宝菊, 李传顺, 等. 南大西洋热液沉积物的不同相态提取方法与元素赋存状态[J]. 海洋学报, 2021, 43 (3): 90-104. [ZHANG Ying, YANG Baoju, LI Chuanshun, et al. Sequential extraction procedure and element occurrence states of hydrothermal sediments from the South Atlantic Ridge [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43 (3): 90-104.]
- [53] Chung Y C, Hung G W. Particulate fluxes and transports on the slope between the southern East China Sea and the South Okinawa trough [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20 (4-5): 571-597.
- [54] German C R, Higgs N C, Thomson J, et al. A geochemical study of metalliferous sediment from the TAG Hydrothermal Mound, 26°08'N, Mid - Atlantic Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1993, 98 (B6): 9683-9692.
- [55] Dias Á S, Mills R A, Taylor R N, et al. Geochemistry of a sediment push-core from the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247 (3-4): 339-351.
- [56] Barrett T J, Taylor P N, Lugooski J. Metalliferous sediments from DSDP Leg 92: the East Pacific Rise transect [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51 (9): 2241-2253.
- [57] Yang Y M, Zeng Z G, Yin X B, et al. Mineralogy, geochemistry, and sulfur isotope characteristics of sediment-hosted hydrothermal sulfide minerals from the southern Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40 (10): 129-143.
- [58] 杨娅敏. 冲绳海槽南部浊流沉积层中的硫化物特征研究[D]. 中国

- 科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2021. [YANG Yamin. Study on the characteristics of turbidite sediments hosted sulfides deposit from the southern Okinawa Trough[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2021.]
- [59] Fujiwara T, Toyoda S, Uchida A, et al. ESR dating of barite in seafloor hydrothermal sulfide deposits in the Okinawa Trough[M]//Ishibashi J I, Okino K, Sunamura M. Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept. Tokyo: Springer, 2015: 369-386.
- [60] Hsu S C, Lin F J, Jeng W L, et al. Observed sediment fluxes in the southwesternmost Okinawa Trough enhanced by episodic events: flood runoff from Taiwan rivers and large earthquakes [J]. [Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers](#), 2004, 51 (7): 979-997.
- [61] Ishibashi J I, Okino K, Sunamura M, et al. Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept[M]. Tokyo: Springer, 2015.
- [62] Ruhlin D E, Owen R M. The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise: examination of a seawater scavenging mechanism [J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 1986, 50 (3): 393-400.
- [63] Olivarez A M, Owen R M. REE/Fe variations in hydrothermal sediments: implications for the REE content of seawater [J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 1989, 53 (3): 757-762.