

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019101201

西北印度洋天休热液区热液成因矿物特征与分布及其指示意义

蔡翌旻^{1,2}, 韩喜球^{1,2,3}, 邱中炎¹, 王叶剑¹, 李谋^{1,3}, Samuel Olatunde Popoola^{1,3}

1. 自然资源部海底科学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

2. 上海交通大学海洋学院, 上海 200240

3. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021

摘要: 海底沉积物中的热液成因矿物主要来自热液区热液产物堆积体的失稳垮塌搬运迁移和热液羽流自生矿物颗粒的沉降。热液成因矿物的类型和空间分布特征对于了解热液活动区的位置与范围具有重要的指示作用。天休热液区(3°41'N、63°50'E)位于卡尔斯伯格脊超镁铁岩系中, 本文对采自该热液区及其周边的共4站表层沉积物样品进行研究, 分析热液成因矿物的组成、丰度和粒度的空间变化情况。研究表明, 在热液喷口近端(0~0.22 km)同时分布有垮塌迁移及热液羽流沉降来源的热液成因矿物, 其中垮塌来源的矿物呈砾—粗砂级, 以古巴矿等金属硫化物矿物及铁氧化物为主; 羽流沉降来源的矿物呈砂—泥级, 以Cu-Zn-Fe硫化物矿物(等轴古巴矿、古巴矿、闪锌矿和磁黄铁矿等)为主。在远喷口端(1.84~6.05 km)主要分布有羽流沉降来源的热液成因矿物, 以砂—泥级的金属氧化物和氢氧化物为主。热液成因矿物的类型、粒度、丰度在空间上呈现出的规律性分布特征可以示踪未知的活动和非活动热液区的位置, 并作为多金属硫化物资源的找矿标志。

关键词: 表层沉积物; 热液成因矿物; 天休热液区; 卡尔斯伯格脊; 印度洋

中图分类号: P744

文献标识码: A

Characteristics, distribution and implication of hydrothermal minerals in Tianxiu Hydrothermal Field, Carlsberg Ridge, northwest Indian Ocean

CAI Yiyang^{1,2}, HAN Xiqiu^{1,2,3}, QIU Zhongyan¹, WANG Yejian¹, LI Mou^{1,3}, Samuel Olatunde Popoola^{1,3}

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

2. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

Abstract: Hydrothermal minerals could originate from mass wasting of hydrothermal deposits or from the hydrothermal plume falling-out. The types and their spatial distribution of hydrothermal minerals are important indicators for constraining the location of hydrothermal field. The Tianxiu Hydrothermal Field (3°41'N, 63°50'E) is an ultramafic-hosted field located on the Carlsberg Ridge, northwest Indian Ocean. In this paper, surface sediments collected from 4 stations near the active venting site of Tianxiu Hydrothermal Field and its surrounding regions were studied on hydrothermal minerals to understand their spatial variations on morphology, composition, abundance and particle size. Near the venting site (0~0.22 km) the hydrothermal minerals are dominated by Cu-Zn-Fe containing sulfide aggregates, in the size from gravel to sand, originated from the mass wasting of the sulfide deposits and precipitation from the hydrothermal fluid. For samples collected outside of the hydrothermal field (1.84~6.05 km away), the hydrothermal minerals are dominated by fine grain hydrothermal oxides and hydroxides derived from plume fallout. Our results suggest that the types and grain size of hydrothermal minerals and their spatial distribution can be served as a good indicator for tracking unknown active and inactive hydrothermal field and prospecting of the associated hydrothermal sulfide resources.

Key words: surface sediments; hydrothermal minerals; Tianxiu Hydrothermal Field; Carlsberg Ridge; Indian Ocean

资助项目: 大洋“十三五”资源评价重大项目“多金属硫化物资源勘查——印度洋靶区项目”(DY135-S2-1-03); 国家自然科学基金面上项目“卧蚕热液区热液沉积记录研究: 对热液活动史及其驱动机制的指示”(41976075), “超镁铁岩型海底块状硫化物矿床中金的富集过程: 以卡尔斯伯格脊天休热液区为例”(41976076); 国家自然科学基金“水圈微生物”重大研究计划重点项目“海底热液区硫化物的微生物氧化作用: 过程、机制及其对海洋硫循环的贡献”(91951201)

作者简介: 蔡翌旻(1994—), 女, 硕士研究生, 从事海底热液成矿研究, E-mail: caiyiyang@sio.org.cn

通讯作者: 韩喜球(1969—), 女, 研究员, 从事海洋地质研究, E-mail: xqhan@sio.org.cn

收稿日期: 2019-10-12; **改回日期:** 2019-11-27. 蔡秋蓉编辑

热液成因矿物是海底热液活动的产物, 形成于海底热液与低温海水的混合过程中, 主要类型包括金属硫化物矿物、富铁氧化物(硅化物)、铁锰氢氧化物、硫酸盐矿物^[1]。其矿物组合、矿物学和矿物形貌学等特征携带有热液成因的相关信息, 常被用来反映热液流体组成及温度等要素^[2-4]。热液成因矿物主要存在两种沉积形式: 热液堆积体(如热液丘和烟囱体等)的失稳垮塌迁移和热液羽流自生矿物颗粒的沉降^[5-8]。热液成因矿物的沉积范围受到热液系统的热源、洋中脊构造环境等要素制约, 不同制约条件的热液系统, 热液成因矿物的空间分布范围具有一定的差异性^[9-13], 如在快速扩张的东太平洋海隆, 岩浆活动频繁, 热液成因矿物可扩散至距海隆超 1 000 km 的区域^[14-15], 而在慢速扩张的北大西洋洋脊, 热液成因矿物分布范围较小, 主要集中在中央裂谷^[15-16]。因而, 热液成因矿物的空间分布对于热液活动区的位置与范围具有一定指示作用。

2015 年, 中国大洋 33 航次在卡尔斯伯格脊 63°50'E 附近发现了天休热液区, 并通过海底视像观察到块状硫化物堆积体以及一处活动喷口^[17]。邱中炎等^[18]对天休热液区表层沉积物进行了全岩稀土元素分析, 结果初步指示沉积物中存在高温热液组分。本文在此基础上进一步对天休热液区活动喷口及其周边地区所采集的表层沉积物进行研究, 分析其中热液成因矿物的粒度特征、矿物学特征以及丰度变化情况, 旨在总结天休热液区热液成因矿物相对活动喷口的空间变化规律。

1 区域地质背景

卡尔斯伯格脊(Carlsberg Ridge)是慢速扩张洋中脊, 其全扩张速率为 22~32 mm/a^[19]。该洋脊地处西北印度洋 10°~2°N 之间, 北起欧文断裂带, 南至郇道元断裂带, 走向由西北-东南向逐渐弯曲至近南北向, 全长约 1 500 km^[20-22]。卡尔斯伯格脊具有 5 个一级洋脊段^[20, 22]。其中, 第 4 洋脊段位于徐霞客断裂带和宝船断裂带之间, 为非对称扩张洋脊段, 构造变形强烈, 岩浆供给不充分, 轴部具有深大断裂, 平均水深 3 750 m^[19-20]。天休热液区位于 3°45'N、63°45'E 附近, 是卡尔斯伯格脊上发现的首个以超镁铁质岩为围岩的热液系统^[17], 地处中央裂谷南侧山坡, 距离洋脊中轴约 5 km, 平均水深约为 3 450 m, 沿北东-西南向呈不规则展布, 与洋脊走向大体垂直(图 1)^[23]。

2 样品与方法

表层沉积物样品由大洋 26 航次和 33 航次利用电视抓斗获取。4 个采样站位分别位于天休热液区活动喷口处、喷口西南侧 0.22 km、西北侧 1.84 km 和西南侧 6.05 km, 水深分布在 2 700~3 500 m(表 1, 图 1)。其中 33I-TVG07 和 26I-TVG05 站位位于活动热液喷口附近, 样品含大量热液成因矿物及围岩碎屑矿物, 颜色深(图 2a), 密度大, 黏稠度高, 易污手。26I-TVG04 和 33I-TVG11 站位与热液喷口距离较远, 样品为正常远洋沉积物, 成分以钙质生物碎屑为主, 含有极少量金属氧化物(氢氧化物), 呈浅黄色, 分选较好, 有颗粒感(图 2b)。

样品分析流程如下: 首先对各站位样品分别进行洗盐、筛分和烘干处理, 并对样品进行分粒径称量。将筛分后粒径 > 1 mm(砾—粗砂)的样品和 < 1 mm(砂—泥)的样品分别进行实验(参照 Udden-Wentworth 粒度分级标准)^[24-25]。用扫描电镜-能谱(SEM-EDS)对粒径 > 1 mm 的样品进行矿物组成鉴定。对粒径 < 1 mm 的样品, 先利用 X 射线衍射分析(XRD)初步确定矿物种类和相对丰度, 再通过双目体视显微镜(型号: LEICA M205 C)进行镜下鉴定及统计, 并用 SEM-EDS 对挑选的典型样品进行矿物学分析。所使用的 X 射线衍射仪型号为 X' Pert PRO, 选用 Cu 靶, 激发电压 45 kV, 电流 40 mA, 测试范围为 0~70°。扫描电镜型号为 Zeiss Ultra-55, 加速电压 15 kV, 能谱型号为 Oxford-Inca X-Max 20, 两项测试分析时使用高真空模式。以上实验均在自然资源部海底科学重点实验室完成。

3 结果

3.1 粒度特征

对各站位粒径 > 1 mm(砾—粗砂)与 < 1 mm(砂—泥)的沉积物样品称量统计结果如图 3 所示。在研究区不同站位, 两种粒径的样品质量百分比不同。近喷口端砾—粗砂级组分百分含量较高, 而远喷口端主体为砂—泥级组分。33I-TVG07 站位(活动喷口处)砾—粗砂级组分质量百分比为 43%, 砂—泥级组分质量百分比为 57%; 26I-TVG05 站位(距喷口 0.22 km)砾—粗砂级组分质量百分比为 22%, 砂—泥级组分质量百分比为 78%; 26I-TVG04 站位(距喷口 1.84 km)砾—粗砂级组分约为 3%, 砂—泥级

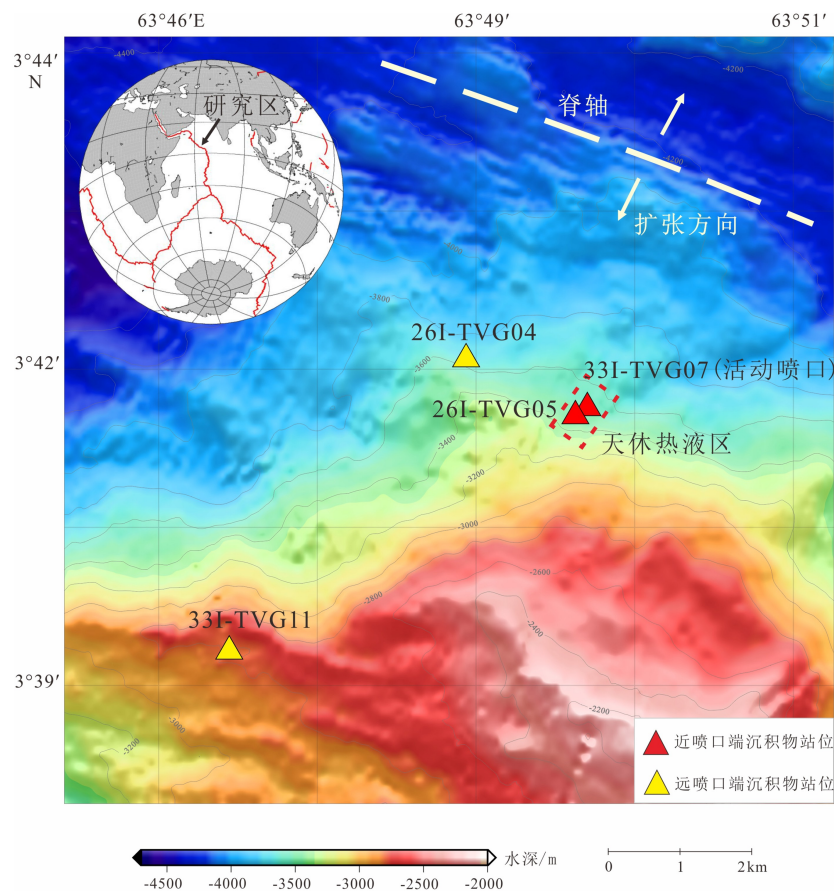


图 1 天休热液区及本文沉积物采样点位置图

多波束地形数据来自中国大洋 24 航次 EM120 多波束测深系统，精度 80 m，等深线间距 200 m。

Fig.1 The location of the Tianxiu Hydrothermal Field and sampling stations

All bathymetry is based on the EM120 data collected by DY 24th cruise in 2012 (200 m contours, accuracy 80 m).

表 1 采样位置信息
Table 1 The coordinates of sampling stations

站位号	纬度(N)	经度(E)	水深/m	采样位置
33I-TVG07	3.68	63.83°	3 504	活动热液喷口处
26I-TVG05	3.69°	63.83°	3 477	活动热液喷口西南侧0.22 km
26I-TVG04	3.70°	63.82°	3 611	活动热液喷口西北侧1.84 km
33I-TVG11	3.66°	63.79°	2 789	活动热液喷口西南侧6.05 km

组分上升至 97%; 33I-TVG11 站位(距喷口 6.05 km), 未见砾—粗砂组分。

3.2 矿物组成及丰度

对各站位沉积物的矿物组成进行了鉴定统计(图 3—6, 表 2), 结果如下: 热液成因矿物在近喷口端和远喷口端均存在, 且矿物类型具有明显差异, 近喷口端主要有黄铁矿、磁黄铁矿、古巴矿、等轴古巴矿、闪锌矿、硬石膏、铁的氧化物和氢氧化物等, 远喷口端仅可见铁锰氧化物和氢氧化物。对粒

径<1 mm 的热液成因矿物进行数量统计, 发现 33I-TVG07 和 26I-TVG05 站位中的热液成因矿物分别占该粒级沉积物中矿物总量的 21% 和 16%; 在 33I-TVG07 站位, 磁黄铁矿、闪锌矿、古巴矿、等轴古巴矿和硬石膏等矿物丰度明显高于 26I-TVG05 站位。远喷口端的 26I-TVG04 和 33I-TVG11 站位, 以远洋钙质沉积为主, 热液成因矿物的丰度极低, 数量百分比低于该粒级沉积物中矿物总量的 1%。除热液成因矿物外, 在近喷口端的沉积物中可见围岩蚀变矿物, 主要以蛇纹石为主; 在远喷口端可见大量生



图 2 天体热液区沉积物甲板照片

a. 近喷口端沉积物甲板采样照片,
b. 远喷口端沉积物甲板采样照片。

Fig. 2 The pictures of sediments near the active vent and in a distance

a. Sediments collected near the hydrothermal vent,
b. Sediments collected far from hydrothermal vent.

物成因钙质矿物。

3.3 形貌特征

利用体视镜和 SEM 观察到, 沉积物中粒径 $> 1\text{ mm}$ (砾—粗砂) 和 $< 1\text{ mm}$ (砂—泥) 粒级的热液成因矿物有明显的形貌学差别。粒径 $> 1\text{ mm}$ 的热液成因碎屑由硫化物矿物及围岩矿物的集合体组成, 多呈棱角状, 部分存在风化现象 (图 5a、5b); 粒径 $< 1\text{ mm}$ 的热液成因矿物多由硫化物单矿物或细粒矿物集合体组成。在近喷口端, 可见大量自形—半自形硫化物和氧化物矿物, 如 33I-TVG07 站位可见六方板状磁黄铁矿 (图 6b)、四面体和菱形十二面体闪锌矿 (图 6a)、半自形等轴古巴矿 (图 6c), 铁氧化物细晶集合体 (图 6f); 在 26I-TVG05 站位可见四面体和十二面体黄铁矿 (图 6c、6d)。远喷口端 26I-TVG04 和 33I-TVG11 站位样品中, 金属氢氧化物多为铁锈色或橙黄色, 呈疏松多孔的隐晶质集合体或胶状集合体, 该形貌特征与 Popoola (2018) 所述氢氧化物较为一致^[26] (图 6i、6k)。

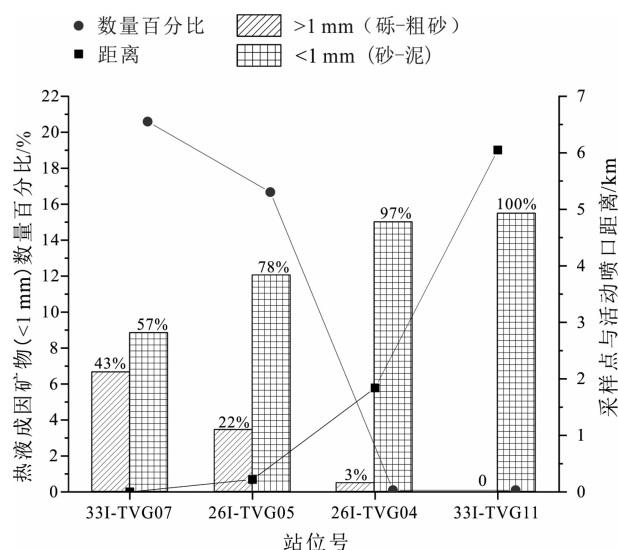


图 3 表层沉积物热液成因矿物中粗颗粒 ($> 1\text{ mm}$) 和细颗粒 ($< 1\text{ mm}$) 的占比及细颗粒热液成因矿物的丰度与喷口距离变化的关系图

Fig. 3 The weight percentage of coarse size ($> 1\text{ mm}$) and fine size ($< 1\text{ mm}$) hydrothermal minerals in the surface sediments and the variation of abundances of fine size hydrothermal minerals ($< 1\text{ mm}$) with distance from active venting site

The bar graph represents the weight percentage of minerals for two grain sizes in metalliferous sediments

4 讨论

4.1 垮塌成因热液成因矿物的分布特征及指示意义

前人研究认为, 海底硫化物堆积体垮塌和坡移是一种普遍存在的物理迁移过程, 可以垮塌碎片等形式向低势能区输送热液信号^[8]。该过程由热液硫化物堆积体的硬石膏骨架阶段性溶解所导致, 贯穿整个热液活动始终^[8, 27]。据此判断, 研究区沉积物中应存在硫化物堆积体垮塌和坡移成因的热液成因物质输入。研究结果显示, 研究区粒径 $> 1\text{ mm}$ (砾—粗砂) 的硫化物、氧化物和围岩矿物的集合体 (图 5a、5b), 其棱角状结构以及局部氧化现象均与上述过程较为符合, 推测为物理迁移的产物, 而该类矿物集合体可能为热液丘体垮塌产生的碎屑。

研究区近喷口端的活动喷口处 (33I-TVG07) 和 220 m (26I-TVG05) 处样品中均发现有上述砾—粗砂粒级的碎屑物质 (图 5a、5b), 而在远喷口端的 1.84 km (26I-TVG04) 和 6.05 km (33I-TVG11) 站位样品中未见。同时, 统计结果显示, 物理迁移对活动喷口处 (33I-TVG07) 的影响最为显著, 对西南侧距喷口 220 m 处的 26I-TVG05 站位的物质输入相较前

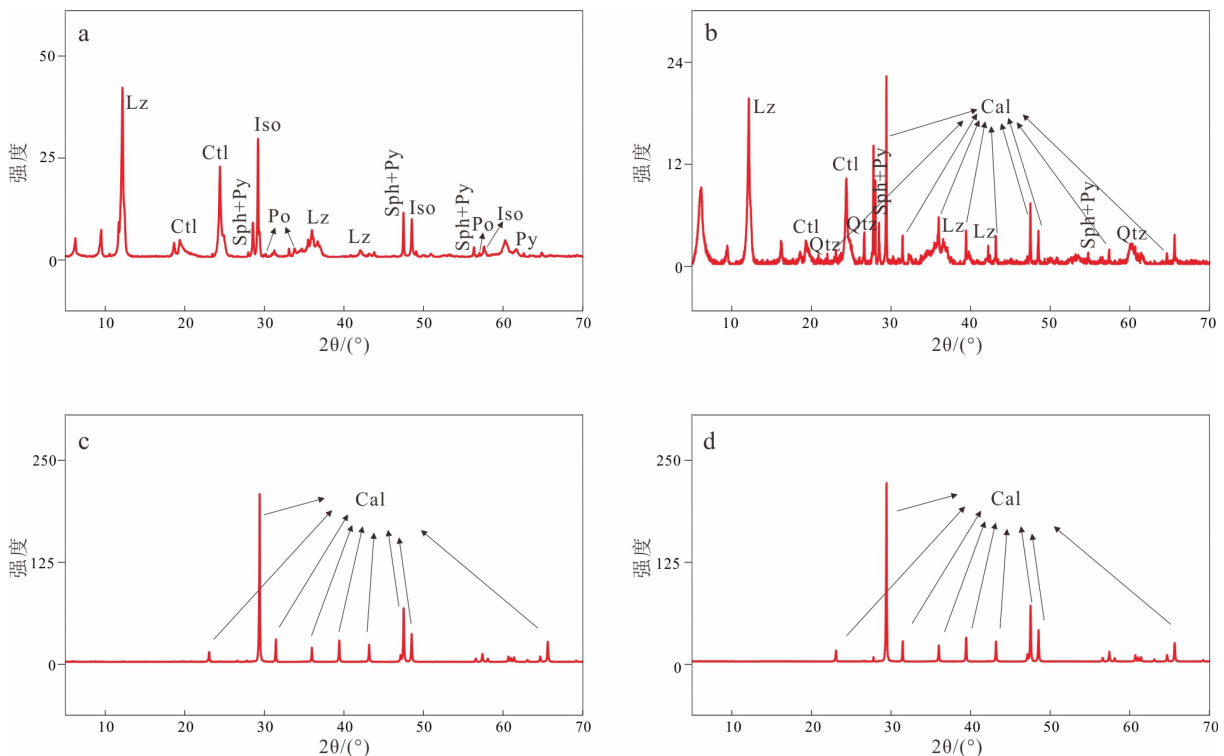


图 4 各站位沉积物样品中粒径<1 mm 矿物的 X 射线衍射分析图谱

a. 33I-TVG07 站位, b. 26I-TVG05 站位, c. 26I-TVG04 站位, d. 33I-TVG11 站位。Iso-等轴古巴矿; Sph-闪锌矿, Py-黄铁矿, Po-磁黄铁矿, Lz-利蛇纹石, Ctl-纤蛇纹石, Cal-方解石, Qtz-石英。

Fig.4 XRD patterns of sediments (grain size <1 mm) from different sampling station

a. station 33I-TVG07, b. station 26I-TVG05, c. station 26I-TVG04, d. station 33I-TVG11.

一站位减半, 但仍有较大影响, 对 1.84 km 处的 26I-TVG04 和 6.05 km 处的 33I-TVG11 的影响极小。(图 3)这在一定程度上表明了随着与热液喷口的距离增加, 沉积物中垮塌来源的物质输入减少, 相应的砾—粗砂级热液成因碎屑物质丰度迅速降低(图 7)。

但值得考虑的是, 物理迁移的距离是否会受到海底地形等因素的影响。前人研究发现, TAG 热液区丘状体直径 200 m, 垂向高度 50 m, 丘状体西、北、东侧均为陡坡, 陡坡顶底垂向高差约 20 m, 可见硫化物垮塌扇, 从硫化物丘底部向外延伸近百米; 南侧为缓坡, 垮塌碎屑堆积范围明显小于前者^[28], 反映了地形陡缓程度对物理迁移距离确实存在影响。研究区活动喷口向北为重力势能降低的方向, 西南侧距喷口 220 m 处与活动喷口处高差约为 27 m (图 1), 由于存在重力作用, 从低处向高处搬运时, 地形对物理迁移存在一定的抑制作用, 但本文研究结果显示, 该区存在明显的垮塌成因物质输入(图 3)。此外, 在活动喷口西北侧 1.84 km 与活动喷口高差约为 -107 m 处, 其物理迁移输入的信号极小。上述现象在一定程度上说明地形的影响作用受到与活

动喷口的距离的制约。因此, 与活动喷口距离仍是垮塌成因热液成因矿物丰度变化的主要控制因素。砾—粗砂级热液成因碎屑物质是热液活动的直观信号, 对热液堆积体及热液喷口的位置具有重要指示意义。

4.2 羽流沉降成因矿物的分布规律及其指示意义

Feely 等^[29]在对东太平洋 Juan de Fuca 洋脊 ASHES 喷口区的研究中发现, 矿物在羽流运移过程中保持持续生长, 当其重力大于羽流浮力时沉积至海底面, 发生沉降的矿物粒径普遍为 2~500 μm, 少数可达到 900 μm^[29]。由此可推测, 天体热液区及其周边区域<1 mm 的热液成因矿物主要形成于羽流沉降过程。同时, Feely 等^[29]对羽流中颗粒物的矿物类型进行了观察鉴定, 总结得到羽流中热液成因矿物主要包括重晶石、硬石膏等硫酸盐矿物、Cu-Zn-Fe 硫化物矿物和 Fe 氧化物等。这与研究区<1 mm 的沉积物中存在的热液成因矿物类型较为一致。

此后, German 等^[30]对大西洋中脊羽流沉降过程进行了研究, 认为元素的沉降具有多阶段性。Rudnicki 等^[31]将 Fe 元素的沉降分为两个阶段, 首先

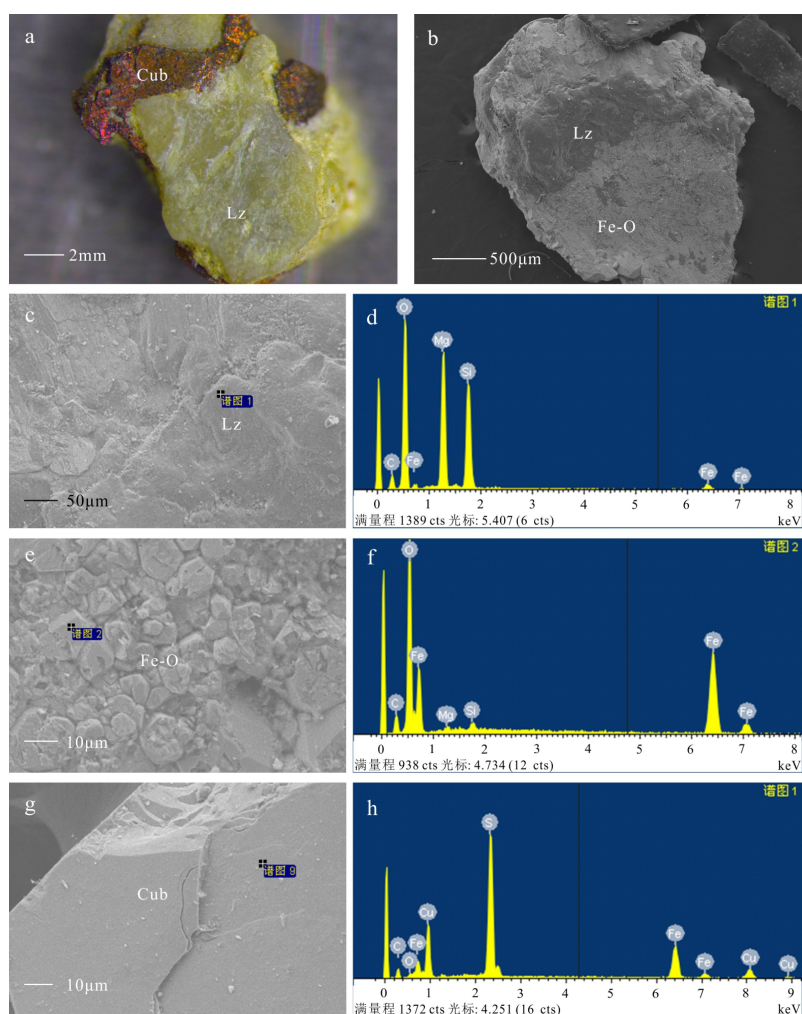


图 5 沉积物中粒径 $>1\text{ mm}$ 的碎屑矿物的典型显微照片和能谱图

a 和 b. 331-TVG07 站位粒径 $>1\text{ mm}$ 的矿物集合体, c-h. a 和 b 的局部放大图像及对应能谱图, a. 双目体视显微镜镜下图像, b、c、e 和 g. 扫描电子显微镜拍摄的二次电子图像; Cub-古巴矿, Lz-利蛇纹石, Fe-O-铁的(氢)氧化物。

Fig.5 Microphotos of typical minerals and their EDS data in sediments with grain size $>1\text{ mm}$

a, b. mineral aggregates from station 331-TVG07 (grain size $>1\text{ mm}$), c-h. enlargement of image a or b and corresponding EDS figures, a. images taken by optical microscope, b, c, e and g. SEM images.

在热液羽流上升阶段主要形成硫化物矿物和氧化物,而后到达中性浮力面并发生扩散沉降,产物主要为氢氧化物。Feely 等^[32]认为,在热液羽流上升初期,Cu、Zn、Fe 等元素同时发生沉降。根据上述研究不难发现,沉降成因的热液成因矿物在以活动喷口为中心的开放区域会形成较为显著的空间分带特征。研究区粒径 $<1\text{ mm}$ 的热液成因矿物分布具有以下特征: Cu-Zn 硫化物矿物,如等轴古巴矿和闪锌矿等集中分布于活动喷口周围(图 7),Fe 元素在喷口周围以硫化物、氧化物和氢氧化物的形式沉淀,在远喷口端仅以氧化物和氢氧化物的形式出现。该分布现象与前人报道的羽流中元素的沉降规律^[30-32]较为一致。

热液成因矿物的数量统计结果显示,随着与活

动喷口的距离增加,热液羽流沉降来源的热液成因矿物百分含量呈现先快速减少,后基本不变的整体趋势(图 3)。与活动喷口处相比,距离活动喷口约 220 m 处的表层沉积物中,热液成因矿物类型和丰度均明显降低,远洋沉积的影响有所增加。随着与活动喷口的距离继续增大(在 220 m~1.84 km 的区间内),热液成因矿物类型和丰度进一步减少至趋于稳定,接近 1.84 km(26I-TVG04)外的极低值。

此外,近喷口端的表层沉积物中普遍存在有半自形的等轴古巴矿(图 6e)和磁黄铁矿(图 6b)等硫化物矿物。等轴古巴矿是现代海底硫化物矿床指示高温的标型矿物^[3, 33-34];而磁黄铁矿的形成温度与晶体对称性相关,六方晶型的磁黄铁矿形成温度高于 308 °C^[35]。因此,在近喷口端沉积物中发现上述

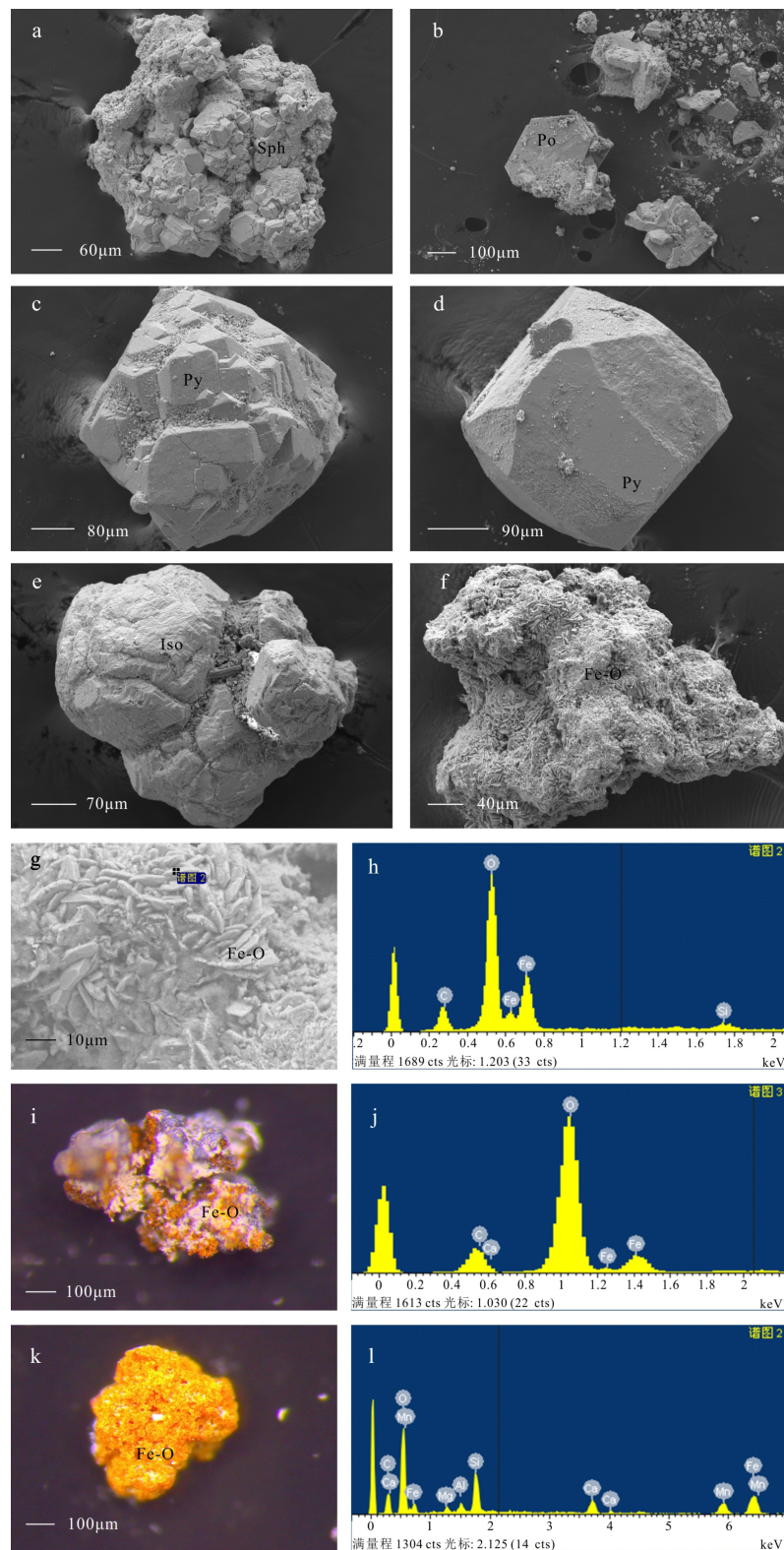


图 6 沉积物中粒径<1mm 的热液成因矿物典型扫描电镜形貌和能谱图

a-f. 33I-TVG07 和 26I-TVG05 站位粒径<1 mm 的硫化物矿物和氧化物矿物, g 和 h. 分别为 f 的局部放大图像及其对应能谱图, i-l. 分别为 26I-TVG04 和 33I-TVG11 站位铁的氢氧化物和能谱图, a-f 和 g. 扫描电子显微镜拍摄的二次电子图像, i 和 k. 双目体视显微镜下图像。

Sph-闪锌矿, Po-磁黄铁矿, Py-黄铁矿, Iso-等轴古巴矿, Fe-O-铁的(氢)氧化物。

Fig.6 SEM Photos and EDS data of typical hydrothermal minerals in sediments with grain size < 1 mm

a-f. sulfide and oxide minerals at station 33I-TVG07 and 26I-TVG05, g. enlargement of image f and h is corresponding EDS figure, i-l. oxide minerals at station 26I-TVG04 and 33I-TVG11, a-f and g. SEM images, i and k. images taken by optical microscope.

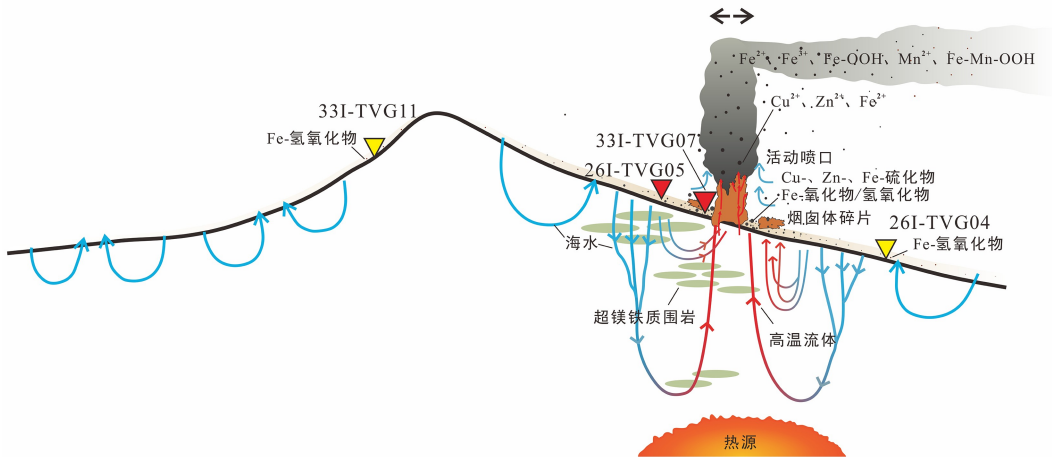


图 7 天体热液区热液成因矿物运移方式及分布特征示意图 (修改自文献 [8])

Fig.7 Schematic diagram of the migration and distribution of the hydrothermal minerals in Tianxiu Hydrothermal Field (Modified after reference [8])

表 2 粒径<1 mm 沉积物中主要矿物半定量统计分析

Table 2 Abundance of major minerals in sediments with grain size < 1 mm

矿物名称	理想化学式	近端		远端	
		33I-TVG07	26I-TVG05	26I-TVG04	33I-TVG11
金属硫化物					
磁黄铁矿 ⁺	Fe _{1-x} S	++	+		
黄铁矿	FeS ₂	++	++		
闪锌矿	(Zn,Fe) S	++	+		
古巴矿 ⁺ /等轴古巴矿 ⁺	CuFe ₂ S ₃	++	+		
金属氧化物					
铁的氧化物/氢氧化物	Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /Fe- (Mn) -OOH	++	++	+	+
围岩碎屑					
		+++	+++		
钙质生物碎屑					
		+	+	+++	+++

注: +++ 代表数量百分比>70%, ++ 代表数量百分比1%~10%, + 代表数量百分比<1%。

晶型矿物(图 6b、6e)指示了天体热液区存在高温热液成矿作用。

5 结论

(1)该热液区表层沉积物中的热液成因矿物可分为两类:①海底热液硫化物堆积体(如硫化物烟囱体)失稳垮塌产生的碎屑;②热液活动产生的羽流中沉降的热液成因矿物。前者多为砾—粗砂级棱角状的矿物集合体,后者多为砂—泥级单矿物或细粒矿物集合体。

(2)垮塌来源的热液成因矿物在活动喷口附近大量堆积,其分布主要受到与喷口距离的制约,随距离增加,丰度迅速下降。羽流沉降的热液成因矿

物的分布具有规律性,Cu-Zn-Fe 硫化物矿物(等轴古巴矿、古巴矿和闪锌矿等)集中分布于活动喷口周围,氧化物和氢氧化物在近喷口端和远喷口端均有出现。随着与活动喷口的距离增加,羽流沉降的热液成因矿物数量百分比呈现先快速减少、后变化缓慢的整体趋势。

(3)围绕热液堆积体及热液喷口,沉积物中热液成因矿物的类型、粒度、丰度具有的规律性分布特征可以对未知的活动和非活动热液区提供良好的指示。

致谢: 中国大洋 33 航次第一航段和 26 航次第一航段全体参航队员对样品采集给予了支持,自然资源部海底科学重点实验室为本文样品分析测试

提供了实验支撑,本次实验所用样品由中国大洋协会提供,在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems[M]. Netherlands: Springer, 2009.
- [2] Fouquet Y, Cambon P, Etoubleau J, et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the mid-atlantic ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit[M]//Rona P A, Devey C W, Dymant J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington, D.C.: AGU, 2010: 321-367.
- [3] Wang Y J, Han X Q, Petersen S, et al. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal precipitates from kairei hydrothermal field, Central Indian Ridge [J]. *Marine Geology*, 2014, 354: 69-80.
- [4] Firstova A, Stepanova T, Cherkashov G, et al. Composition and formation of gabbro-peridotite hosted seafloor massive sulfide deposits from the ashadze-1 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge [J]. *Minerals*, 2016, 6(1): 19.
- [5] 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*, 1993, 98 (B6): 9671-9681.
- [6] Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the Active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (17): 3511-3524.
- [7] German C R, Barreiro B A, Higgs N C, et al. Seawater-metasomatism in hydrothermal sediments (Escanaba Trough, Northeast Pacific) [J]. *Chemical Geology*, 1995, 119 (1-4): 175-190.
- [8] German C R, Seyfried W E Jr. Hydrothermal processes[M]//Treatise on Geochemistry. 2nd ed. New York: Elsevier, 2014, 8: 191-233.
- [9] Gurvich E G. Metalliferous Sediments of the World Ocean[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [10] Andreani M, Escartin J, Delacour A, et al. Tectonic structure, lithology, and hydrothermal signature of the Rainbow massif (Mid-Atlantic Ridge 36°14'N) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(9): 3543-3571.
- [11] Dias Á S, Barriga F J A S. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted saldanha hydrothermal field (36°34'N; 33°26'W) at MAR [J]. *Marine Geology*, 2006, 225 (1-4): 157-175.
- [12] Gràcia E, Charlou J L, Radford-Knoery J, et al. Non-transform offsets along the Mid-Atlantic Ridge south of the Azores (38°N-34°N): Ultramafic exposures and hosting of hydrothermal vents [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2000, 177 (1-2): 89-103.
- [13] 李家彪. 现代海底热液硫化物成矿地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017. [LI Jiabiao. Modern Seafloor Hydrothermal Mineralization[M]. Beijing: Science Press, 2017.]
- [14] 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.
- [15] Hepburn L E. Hydrothermal sediment geochemistry south of the Antarctic Polar Front[D]. Doctor Dissertation of University of Southampton, 2015.
- [16] Mills R A, Elderfield H. Hydrothermal activity and the geochemistry of metalliferous sediment[M]//Humphris S E, Zierenberg R A, Mullineaux L S, et al. Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions. Washington, D.C., USA: American Geophysical Union, 1995.
- [17] Han X, Wang Y, Li X. First ultramafic-hosted hydrothermal sulfide deposit discovered on the Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean[C]//Proceedings of the the Third InterRidge Theoretical Insitute. Hangzhou, 2015.
- [18] 邱中炎, 韩喜球, 王叶剑, 等. 西北印度洋卡尔斯伯格脊沉积物特征及其找矿启示[J]. 矿物学报, 2015, 35 (S1): 776. [QIU Zhongyan, HAN Xiqu, WANG Yejian, et al. The characteristics of sediments in Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean and the implications for prospecting [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35 (S1): 776.]
- [19] Kamesh Raju K A, Chaubey A K, Amarnath D, et al. Morphotectonics of the Carlsberg Ridge between 62°20' and 66°20'E, Northwest Indian Ocean [J]. *Marine Geology*, 2008, 252 (3-4): 120-8.
- [20] 韩喜球, 吴招才, 裘碧波. 西北印度洋Carlsberg脊的分段性及其构造地貌特征——中国大洋24航次调查成果介绍[C]//第二届深海研究与地球系统科学学术研讨会论文集. 上海: 同济大学, 2012: 259-259. [HAN Xiqu, WU Zhaocai, QIU Bibo. Segmentation of the Carlsberg Ridge in the Northwest Indian Ocean — Report for Chinese DY24th Cruise[C]. 2012.]
- [21] Ray D, Misra S, Banerjee R. Geochemical variability of MORBs along slow to intermediate spreading Carlsberg-Central Indian Ridge, Indian Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 70.
- [22] 余星, 韩喜球, 邱中炎, 等. 西北印度洋脊的厘定及其地质构造特征[J]. 地球科学, 2019, 44 (2): 626-639. [YU Xing, HAN Xiqu, QIU Zhongyan, et al. Definition of Northwest Indian Ridge and its geologic and tectonic signatures [J]. *Earth Science*, 2019, 44 (2): 626-639.]
- [23] 韩喜球, 王叶剑, 李洪林, 等. 国际海底区域资源研究开发“十二五”课题课题研究报告[R]. 中国大洋协会办公室, 2015. [HAN Xiqu, WANG Yejian, LI Honglin, et al. Report of the 12th five-year plan on the research and development of resources in the international seafloor[R]. 2015.]
- [24] Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks[M]. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company, 1980.
- [25] Tucker M E. Sedimentary Rocks in the Field[M]. 3rd ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [26] Popoola S O, Han X Q, Wang Y J, et al. Geochemical investigations of Fe-Si-Mn oxyhydroxides deposits in wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean: Constraints on their types and origin [J]. *Minerals*, 2019, 9(1): 19.
- [27] Humphris S E, Herzig P M, Miller D J, et al. The internal structure of an active sea-floor massive sulphide deposit [J]. *Nature*, 1995, 377(6551): 713-716.
- [28] Tivey M K, Humphris S E, Thompson G, et al. Deducing patterns of

- fluid flow and mixing within the TAG active hydrothermal mound using mineralogical and geochemical data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100 (B7): 12527-12555.
- [29] Feely R A, Geiselman T L, Baker E T, et al. Distribution and composition of hydrothermal plume particles from the ASHES Vent Field at Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95 (B8): 12855-12873.
- [30] German C R, Campbell A C, Edmond J M. Hydrothermal scavenging at the Mid-Atlantic Ridge: Modification of trace element dissolved fluxes [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, 107 (1): 101-114.
- [31] Rudnicki M D, Elderfield H. A chemical model of the buoyant and neutrally buoyant plume above the TAG Vent Field, 26 degrees N, Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(13): 2939-2957.
- [32] Feely R A, Massoth G J, Trefry J H, et al. Composition and sedimentation of hydrothermal plume particles from North Cleft Segment, Juan de Fuca Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99 (B3): 4985-5006.
- [33] René C, Cervelle B, Cesbron F, et al. Isocubanite, a new definition of the cubic polymorph of cubanite CuFe_2S_3 [J]. *Mineralogical Magazine*, 1988, 52 (367): 509-514.
- [34] Jamieson J W, Hannington M D, Petersen S, et al. Volcanogenic massive sulfides[M]//Harff J, Meschede M, Petersen S, et al. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Dordrecht: Springer, 2014: 1-9.
- [35] Vaughan D J, Craig J R. *Mineral Chemistry of Metal Sulfides*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.