

海底热液活动的环境与产物

曾志刚^{1,2,3,4,5}, 陈祖兴^{1,2,5}, 张玉祥^{1,2,5}, 杨娅敏^{1,2,4}, 李晓辉^{1,2,5}, 齐海燕^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266061; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 近 23 年的调查研究, 使我们认识到分布于洋中脊、弧后盆地、岛弧和热点等环境的海底热液活动发育在多种围岩类型之上, 包括超基性岩石、基性岩石、中性岩石、酸性岩石和沉积物。海底热液活动经历了岩浆去气作用、流体-岩石/沉积物相互作用和流体-海水混合, 获取了岩浆、岩石、海水和沉积物的物质, 构成了热液循环, 产生了高温、低氧、高或低 pH 值、富含 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Hg、As 等元素以及气体组分(甲烷、氢等)的喷口流体, 影响了海水、沉积、岩石和生物环境, 形成了热液柱、硫化物、含金属沉积物和蚀变岩石等热液产物, 组成了海底热液系统。未来, 促进海底热液活动探测技术和热液产物测试方法的发展, 对海底热液区的岩石、喷口流体、热液柱、硫化物、含金属沉积物以及热液循环、生物活动的持续观测与研究, 无疑将为人类探知海底地质过程及生命活动、保护海底热液环境和合理开发利用海底资源提供有力的工作支撑。

关键词: 热液环境; 热液产物; 喷口流体; 物质循环

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)07-0143-13
DOI: 10.11759/hyxx20200316001

现代海底热液活动主要分布在洋中脊、弧后盆地、岛弧和热点环境, 其热液区可进一步分为 4 大类: (1)有沉积物覆盖的洋中脊热液区, 沉积物和火成岩构成热液活动的围岩; (2)无沉积物覆盖的洋中脊热液区, 火成岩构成热液活动的围岩; (3)弧后盆地扩张中心热液区, 热液活动的围岩类型多样(基性、中性和酸性火成岩以及沉积物); (4)岛弧和热点热液区, 火成岩构成热液活动的围岩^[1-2]。

海底热液活动的环境差别, 主要体现在: (1)热液活动的硫化物、硫酸盐等热液产物出露的基底及热液活动的围岩是沉积物还是火成岩, 或是二者兼有; (2)热液区是否有沉积物覆盖; (3)热液区分布在洋中脊扩张中心、弧后盆地扩张中心还是岛弧、热点构造环境等方面。即构造环境、热液产物出露的基底及热液活动的围岩类型等因素的差异, 是导致海底热液活动环境不同的关键因素。这预示着热液区的喷口流体和热液产物的物理性质和化学组成也存在相应的变化, 致使周围的海底岩石、沉积、海水和生态环境产生了不同的响应^[1-2]。

1 海底热液活动的环境

1.1 洋中脊

1.1.1 东太平洋海隆 13°N

东太平洋海隆(East Pacific Rise, EPR)的扩张速

率可达 17.2 cm/a, 是一个典型的快速-超快速扩张洋脊, 同时也是一个热液区(点)分布比较密集的地段。其中, EPR 13°N 位于 Orozco 断裂带(EPR 15°N)与 Clipperton 断裂带(EPR 10°N)之间, 走向为 345°±5°, 全扩张速率约为 10~12 cm/a, 属快速扩张洋中脊^[3]。该海隆轴部具宽度 200~600 m, 深度 20~50 m, 水深 2 500~2 700 m(底部平均水深为 2 630 m)的地堑结构^[4], 其底部平坦, 中央分布较多裂隙^[5-6], 基底主要由洋中脊玄武岩(Mid-Ocean Ridge Basalt, MORB)组成, 较少有沉积物覆盖, 且在 12°37'N 和 12°54'N 两处, 显示出双洋脊结构。同时, 在海隆的西翼有平行海隆

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(91958213); 全球变化与海气相互作用专项(GASI-GEOGE-02); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(133137KYSB20170003); 大洋“十三五”深海资源潜力评估项目(DY135-G2-1-02); 泰山学者工程专项(ts201511061); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB429700)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 91958213; National Program on Global Change and Air-Sea Interaction, No. GASI-GEOGE-02; International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences, No. 133137KYSB20170003; National Special Fund for the 13th Five Year Plan of COMRA, No. DY135-G2-1-02; Special Fund for the Taishan Scholar Program of Shandong Province, No. ts201511061; National Key Basic Research Program of China, No. 2013CB429700]

作者简介: 曾志刚(1968-), 男, 湖南邵东人, 研究员, 主要从事海底热液活动研究, E-mail: zgzeng@qdio.ac.cn

轴部的裂隙与断层,走向介于 $350^{\circ}\sim 30^{\circ}$,断层密度为5.4条/km,在海隆的东翼,断层密度为2.5条/km,走向介于 $345^{\circ}\sim 350^{\circ}$ [7]。根据海隆的构造特征和基底地形,Choukroune等[3]将EPR 13°N 附近的海隆分为4个区域:(1)位于海隆轴部地堑的活动火山带;(2)构成海隆轴部地堑并向两翼延展大约2 km的活动构造区;(3)距离海隆轴部超过2 km的区域,即由不连续地垒和地堑构成的非活动构造区;(4)距离海隆轴部不超过20 km的轴外火山(海山)区。不仅如此,在EPR 13°N 附近的洋壳下方1~2 km处还存在着透镜状的岩浆房,其沿海隆轴部方向连续分布,呈薄且窄的席状熔融体,位于厚度约为1~1.5 km的碎晶带之上[8]。此外,McClain等[9]通过分析该海隆的地震反射数据,也指出其海底浅部地壳中可能存在一个与岩浆房有关的低速带。

到目前为止,在EPR 13°N 的深潜取样已超过100次,发现热液活动点达149处[10],主要分布在水深2 000~3 000 m的三个构造单元中:轴部地堑区、地堑两翼断层区以及离轴地段[10-11]。其中,热液硫化物和Si-Fe-Mn羟基氧化物堆积体主要分布于轴部地堑区和离轴地段的MORB基底之上[6, 11-14],且该MORB基底经历了较强的热液蚀变,在此过程中,由于流体-玄武岩相互作用,使得对MORB进行蚀变改造的热液流体,其化学组成也产生了相应的变化[6]。同时,在海隆远离热液喷口的东西两翼 $\sim 200\times 10^3\text{ km}^2$ 范围内还观测到含金属沉积物的存在[15-17]。

1.1.2 大西洋洋中脊 TAG 热液区

TAG(Trans-Atlantic Geotraverse)热液区位于大西洋洋中脊 $26^{\circ}08'\text{N}$, $44^{\circ}50'\text{W}$,靠近无沉积物覆盖洋中脊裂谷东壁一侧的谷底中,分布着热液产物、火山岩和断裂,面积约为 25 km^2 。其中,裂谷东壁一侧的谷底,由一系列阶状断块组成,断块边缘为陡的倾向西的正断层;而裂谷的西壁一侧则由几个不连续的隆起阶地组成,其高出谷底1 400 m左右[18]。裂谷中出露的火山岩为MORB,形成该MORB的岩浆在演化过程中受结晶分异作用控制,经历较短时间的滞留,上升之后在浅部岩浆房发生结晶作用,随后快速在海底表面喷出,暗示着该区热液循环系统的下部分布着一个深层的岩浆热源[18-19]。

在TAG热液区,高温热液活动区和流体停止活动的热液丘状堆积体主要分布在裂谷底部近东壁一侧的地段,低温热液活动区的块状和层状的铁、锰氧化物与绿脱石主要分布在水深2 400~3 100 m的裂谷

东壁[20],两个流体停止活动的热液区(Alvin和Mir区),其硫化物丘状堆积体则位于裂谷东壁地势较低的地段[19],并遭受了多阶段海底风化作用的影响。特别是,在高温热液活动区,直径约为200 m,高为50 m的热液丘状堆积体,呈现由陡坡和平台构成的一个两层环形堆积体,平台表面凹凸不平,由硫化物碎片、碎块,耸立和已倒塌的烟囱体,以及Fe-Mn氧化物壳等热液产物组成,表明其形成经历了两个堆积阶段[19, 21]。不仅如此,在该堆积体中央的西北部,从黑烟囱体喷出的流体温度高达 363°C ,白烟囱体喷出的流体温度为 $260\sim 300^{\circ}\text{C}$ [20]。同时,在该热液区的黑烟囱体附近还发现了温度达 50°C 的低温扩散流体,反映出其热液活动具多样性、长期性和多阶段性的特征[22-24],且放射性定年确定TAG热液区自 $4\sim 5\times 10^4$ 年前就已经开始了阶段性的热液活动[25-26]。

1.2 弧后盆地

1.2.1 冲绳海槽

冲绳海槽(Okinawa Trough, OT)位于西北太平洋的东海大陆架东缘和琉球(Ryukyu)沟-弧体系的西北侧,北起日本九州,槽宽达230 km,水深约200 m;南至中国台湾,槽宽60~100 km,水深达2 300 m,呈狭长的弧形,延伸长达1 200 km,是一个处于活动阶段的弧后扩张盆地,其形成与菲律宾海板块向欧亚大陆的俯冲有关,与琉球海沟、琉球岛弧构成了完整的沟-弧-盆体系。

冲绳海槽受板块俯冲作用的影响,其内部分布着一系列NE向的平行火山岩脊以及相间排列的若干水深约1 300~1 600 m由构造塌陷形成的地堑盆地。西北走向的吐喀喇断裂带和宫古断裂带将该海槽分为北、中、南三段[27-31],其对应的地壳厚度从北到南呈逐渐减薄的趋势(北段约30 km,中段约20 km,南段约12 km)[29-32]。

冲绳海槽的岩浆活动发育,根据海上调查采样结果发现,北中南三段的火山岩类型存在明显差异:北段以流纹岩和英安岩为主,且浮岩是流纹岩和英安岩的主要产出形式[30];中段以流纹岩和玄武岩为主,出露少量的安山岩,火山岩呈双峰式的分布特征;而南段地堑中以玄武岩或玄武质安山岩为主[29]。同时,海槽分布着厚度达20~30 m未固结的全新世深海粉砂质黏土,其下伏晚更新世的长英质火山岩,与泥质沉积物和酸性凝灰岩互层产出[33]。此外,受该区强烈的岩浆作用、构造演变和热液活动影响,冲绳海槽

具异常高的地热异常(热流值 $10^2\sim 10^5$ mW/m²)^[34-36]。

冲绳海槽的海底热液活动主要分布在海槽的中部和南部,包括中部的夏岛 84-1 热液区、伊平屋北热液区、Jade 热液区以及南部的唐印热液区。其中,伊平屋北热液区位于伊平屋北海丘中央峡谷的西部山坳,9 个热液喷口,呈南北向沿断裂分布,其北部大烟囱体(Northern Big Chimney, NBC)具最高的喷口流体温度和流速^[37]。Jade 热液区则位于冲绳海槽中部伊是名海洼(Izena Cauldron)的东北坡,水深 1 200~1 610 m,呈 SW-NE 向宽约 600 m,长 1 800 m 的带状展布,面积约 1×10^6 m²。其中,火成岩主要以凝灰岩为主,沉积物以泥质和粉砂为主,热液产物以硫化物-硫酸盐烟囱体与丘状堆积体的形式产出,主要由闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、黝铜矿、硬石膏、重晶石以及隐晶质二氧化硅和铅矾等矿物组成^[31]。此外,在 Jade 热液区及其附近的海底常可见到海绵动物、白海星、海参、海胆、苏阳箱蛤、云雀贝、深海偏顶蛤、深海腰折虾、铠甲蟹、蠕虫、鱼和章鱼等多种生物以及底栖生物孔穴或生物残骸^[38]。

1.2.2 马努斯海盆

东马努斯海盆的岩浆类型多样,从玄武质岩浆到流纹质岩浆均有,其形成了线状分布的安山岩和英安岩火山脊^[39-42]。其间,分布着 DESMOS、SuSu Knolls、PACMANUS 热液区。其中,PACMANUS 热液区分布在 1.5 km 长的 Pual 火山脊上,主要由 4 处高温热液点(Roman Ruins、Roger's Ruins、Satanic Mills 和 Tsukushi)和 1 处低温热液点(Snowcap)构成。在 Snowcap 低温热液点中,蚀变英安岩的露头上均覆盖着 Fe-Mn 氧化物^[43];在 Roman Ruins 和 Satanic Mills 高温热液点,烟囱体主要由黄铜矿、闪锌矿以及少量的黄铁矿、斑铜矿、砷黝铜矿和方铅矿等矿物组成,其 Au 和 Ag 含量高(质量比平均值分别达 15 μ g/g 和 320 μ g/g)。同时,有证据表明部分岩浆物质及气体挥发份已进入该区的热液流体中^[42-44]。此外,在该区的海底表面及海底面以下,由黏土-硫化物-硫酸盐矿物组成的集合体中存在着大量的化能自养型微生物,这些微生物包含需氧和厌氧型,其最高适应温度为 90 $^{\circ}$ C^[43]。

1.2.3 龟山岛热液区

龟山岛位于冲绳海槽的西南端,靠近台湾东部宜兰县,在地质构造上是琉球沟-弧-盆体系的一部分,也是冲绳海槽扩张轴向西南延伸形成的最后一个火

山中心,主要由安山岩和火山碎屑沉积物组成^[45-47]。

龟山岛热液区位于龟山岛向海面下自然延伸的翼部(121 $^{\circ}$ 55'E, 24 $^{\circ}$ 50'N, 水深 10~20 m),面积为 0.5 km²,热液产物主要包括喷口流体、自然硫烟囱体、自然硫球、硫磺砂、热液柱和热液生物等。其中,喷口流体包括黄泉喷口流体(92~116 $^{\circ}$ C)和白泉喷口流体(48~62 $^{\circ}$ C)两种类型^[48],其 CO₂和 H₂S 气体含量相对较高,而 SO₂和 HCl 气体含量相对较低^[49],且喷口流体的温度受潮汐变化的影响较大,在潮汐达到高潮之后 2~4 h,喷口流体的温度也达到最高^[50-52]。

2 热液区及邻域的岩石环境

2.1 东海陆架边缘北部的玄武岩

东海由陆架、陆坡、海盆、岛弧和海沟构成,是中国边缘海盆地的重要组成部分,其形成演化一直备受国内外海洋地质学家的关注。东海整体呈现东西分带、南北分块的区域构造特征,反映了其在形成演化过程中各构造单元之间存在着内在联系,同时也是造成东海复杂构造演化特征的重要原因。因此,研究东海形成演化过程的内在联系,对于深入认识其南北差异的形成机制具有重要的意义^[53],也是了解冲绳海槽热液活动的区域构造、岩浆环境的重要一环。我们的初步研究表明,东海陆架边缘北部玄武岩的主要斑晶矿物是拉长石、贵橄榄石和普通辉石,且其单斜辉石的结晶温度达 1 108.49 $^{\circ}$ C,形成该玄武岩的岩浆起源深度为 42.9 km。此外,东海陆架边缘北部玄武岩中斜长石的 An 值、辉石的 Ca-Mg-Fe 比例以及橄榄石的 Fo 值与冲绳海槽和琉球岛弧玄武岩的均存在明显差异,表明这三地的玄武岩具有明显不同的成因机制^[53]。

2.2 东太平洋海隆 13 $^{\circ}$ N 附近的玄武岩及其玻璃

MORB 是在洋中脊扩张过程中由地幔物质上涌,经减压熔融形成的,其岩石地球化学特征记录并反映了上地幔源区的地球化学特征。同时,EPR 13 $^{\circ}$ N 附近的 MORB 也是海底热液活动的主要围岩。因此,研究 MORB 可示踪洋中脊的地幔组分,有助于了解海底热液活动的物源体系,深入认识全球板块构造及其地幔物质组成^[54]。EPR 13 $^{\circ}$ N 附近的 MORB 及其火山玻璃样品的微量元素组成表明,该区玄武质岩浆可能来自不同的地幔端员,受非均质地幔源区的影响较大,经历了双组分地幔的熔融过程,且富

集组分对该地幔源区的岩浆有一定程度的影响^[54]。

2.3 冲绳海槽西南部流纹岩中的角闪石

角闪石的化学成分可用来确定其形成时的结晶条件,对了解寄主岩浆的起源、演化以及岩石的成因具有指示意义。尽管如此,前人主要利用全岩地球化学方法对冲绳海槽火山岩进行了研究,而矿物学方面也大多集中于对斜长石及辉石的化学成分分析,对角闪石的研究较少^[29],不清楚火山岩中斑晶矿物在流体-岩石相互作用过程中的表现。我们通过分析冲绳海槽西南端流纹岩中角闪石的主量和微量元素组成,结果表明角闪石结晶时的温压条件分别为:775~839 °C 和 0.12 GPa, 具 Sc、V、Cr、Co、Ni 和 REE 富集, Rb、Sr、Ba、Zr、Th、U 和 Pb 元素相对亏损的特征。进一步论证了该流纹岩中的角闪石为壳-幔混合成因,其寄主流纹质岩浆是由幔源玄武质岩浆与壳源长英质岩浆混合后在浅层岩浆房中结晶分异形成的,且壳幔混合源很可能是该区域岩浆的主要来源^[29]。这为进一步研究角闪石在热液流体-岩石相互作用过程中的矿物、地球化学行为提供了研究基础。

3 海底热液活动形成的流体、热液柱和硫化物

3.1 流体和热液柱

3.1.1 龟山岛热液区的喷口流体

台湾东北部龟山岛热液区中流体的来源复杂,岩石和/或海水均有可能为其流体提供物质。我们研究了龟山岛热液区中黄泉与白泉喷口流体的稀土元素(Rare earth element, REE)组成,发现黄泉与白泉喷口流体均具轻稀土元素(LREE)相对富集的特点,且黄泉与白泉喷口流体的稀土元素总量(Σ REE)相似(813~1 212 ng/L),均明显高于海水中的 REE 含量。同时,黄泉与白泉喷口流体分别呈现出弱的负 Eu 异常和无 Eu 异常,这可能与龟山岛热液区喷口流体的相对低温(< 200 °C)以及该热液区海底面以下流体-岩石相互作用时间较短有关。此外,黄泉喷口流体的 REE 组成受到了流体低 pH 值(2.81 和 2.29)、流体沸腾以及自然硫沉淀的影响,而白泉喷口流体的 REE 则主要受细小颗粒物的吸附作用以及稀土元素与氯络合作用的控制^[47]。

3.1.2 热液柱的温度异常计算

为了寻找、发现海底热液活动区,掌握海底热液柱的温度异常及其空间分布至关重要。热液柱的温

度异常值是指在同一海区等密度层位处热液柱的温度与正常海水温度之间的差值。计算海底热液柱的温度异常值的方法有 3 种:第一种方法主要是通过拟合背景海水的位势温度-位势密度或位势温度-盐度曲线,得到它们两两之间的关系变化。随后,将获得的温度、盐度或密度变化值与海水背景值作比较,从而计算出热液柱的温度异常值^[12];第二种方法则是利用热液柱的位势温度-位势密度或位势温度-盐度曲线,找出并扣除曲线上的异常结点,之后再将其余的点作位势温度-密度或位势温度-盐度拟合曲线。随后,将新获得的曲线延伸到异常区域,并将此假设的正常海水曲线与异常区域内的变化曲线相比较,从而计算得到热液柱的温度异常值^[55-56];第三种方法则是通过热液柱平衡高度和盐度梯度或密度梯度计算得出热液柱的温度异常值^[57]。尽管如此,这 3 种方法在动态反映热液柱的扩散状况方面仍稍显不足。为此,我们提出了两种新方法:重采样法和迭代法,不仅消除了人为控制结点而引起的计算热液柱温度异常误差,还可对海底热液柱的温度异常进行高效、自动化计算,方法操作简单、方便快捷,拟合获得的背景指标关系较好,且计算得到的热液柱的温度异常值,其误差范围较小,不仅可以更有效地比较不同热液柱之间的温度异常,同时也能更好地对热液柱动态信息进行辨别,这有助于寻找新的海底热液活动区^[58]。

3.2 海底热液硫化物

3.2.1 东太平洋海隆 13°N 附近的热液硫化物

海底热液硫化物是海底热液活动的产物,记录了海底热液活动的演化过程。因此,研究硫化物的矿物组合、结构构造、元素和同位素组成,将有助于深入认识热液流体的演变过程、海底面以下流体-岩石相互作用以及海水的物质贡献情况^[13]。为此,我们曾对 EPR 13°N 附近的热液硫化物进行了矿物和化学组成分析,结果显示硫化物的矿物组合影响其分散和稀有元素(In、Li、Cs 等)的含量,且 Cd、Cs 和 P 等元素的含量分别受控于 Zn、Fe 和 Cu 的硫化物。不仅如此,受海底风化作用的影响,致使硫化物中微量元素比值原有的相关性产生了变化,V、Mn 和 REE 主要富集在红褐色硫化物氧化层中,该氧化层具有与海水较为一致的 REE 配分模式。在热液硫化物的矿物由高温到低温的形成过程中,其元素以及硫(S)、铅(Pb)同位素组成受海水的影响程度越来越

大,致使硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值和 Fe 含量不断增加,而 Pb 同位素比值和 Zn 含量则逐渐减小^[13]。此外,根据海底热液硫化物丘状体或喷口群的形态及规模,可估算海底热液区中硫化物堆积体储量的保守值^[16]。

3.2.2 Jade 热液区中硫化物的元素和铀系同位素组成

时至今日,对冲绳海槽 Jade 热液区硫化物中稀有和分散元素的特征、含硫酸盐矿物的硫化物中 REE 的特征均知之甚少,也缺乏年代学的数据^[59]。为此,通过分析 Jade 热液区中硫化物的元素以及铀同位素组成,发现含硫酸盐矿物的硫化物,其 LREEs 相对富集,且 ^{210}Pb 放射性比度(单位: dpm/g, dpm: 每分钟衰变次数)和 ^{210}Pb 放射性比度与 Pb 质量比的比值(dpm/ μg)极低。此外,基于硫化物中 ^{210}Pb 放射性比度与 Pb 质量比的比值、U 同位素组成以及 ^{232}Th 放射性比度值和 ^{230}Th 放射性比度值均处于背景水平的事实,计算得出 Jade 热液区中热液硫化物的形成年龄在 0.2~2 ka^[59]。

3.2.3 硫化物的稀土元素组成

稀土元素(REE)具有较为稳定的地球化学性质,在现代海底热液活动研究过程中常用作指示海底热液活动化学演化及其物质来源的示踪剂^[19]。我们曾分析大西洋洋中脊 TAG 热液区中硫化物的 REE 组成,发现其 REE 的变化可能受控于该区热液系统中流体和海水混合的程度,且硫化物中的 REE 部分来自下伏的玄武岩基底。同时, LREE 在硫化物的形成过程中得到富集,其 Eu 的变化则可以反映出热液流体的演变特征^[19]。

在冲绳海槽的 Jade 热液区,大多数硫化物样品呈负 Eu 异常和 LREE 相对富集的特征,显示流体-岩石的相互作用以及海水和流体不同程度的混合造成了硫化物样品中 REE 组成的变化。进一步,证实硫化物中的 REE 部分来自沉积物和火山岩,且经历了流体-海水混合过程的硫化物,其 REE 组成记录了流体-海水混合作用的信息^[31]。

3.2.4 硫化物的硫同位素组成

在研究硫化物集合体及其单矿物之间的 S 同位素组成关系基础之上^[60],我们分析了大西洋洋中脊 TAG 热液区和冲绳海槽 Jade 热液区中硫化物的 S 同位素组成。结果显示, TAG 热液区中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 +3.9‰~+7.6‰,其 S 大部分来自玄武岩,较少部分来自海水硫酸盐,且海水和玄武岩为硫化物提供 S 的主要方式为海水的加入、流体-玄武岩相互作用、硫酸盐矿物的还原作用以及先期形成硫化物的重溶

作用^[22]。在 Jade 热液区,硫化物、硫酸盐和自然硫中的 S 主要来自中、酸性火山岩和海水,且海底沉积物也可为经历了流体-沉积物相互作用过程的流体及其沉淀的硫化物提供 S。同时, S 的来源、构造演化以及岩浆活动控制着硫化物的 S 同位素组成特征^[35]。

不仅如此,全球范围内,构造环境对热液产物中的 S 同位素组成及其 S 源产生了影响,研究发现:(1)海底热液硫化物($\delta^{34}\text{S}=+1\text{‰}\sim+9\text{‰}$, 均值 4.5‰, $n=1042$)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显低于硫酸盐矿物的($\delta^{34}\text{S}=+19\text{‰}\sim+24\text{‰}$, 均值 21.3‰, $n=217$);(2)无沉积物覆盖热液区中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$, 其变化范围明显小于沉积物覆盖热液区硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的,前者的 S 源主要为玄武岩和海水,而后者中的 S 除了来自玄武岩和海水外,沉积物和有机质也可为硫化物的形成提供 S,这表明 S 来源的差异是导致各热液区硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围不同的主要因素;(3)海底热液系统中流体物理化学性质的差异、岩浆演化过程以及构造背景的不同是控制海底热液产物中 S 同位素组成变化以及 S 源不同的主要原因^[2, 61]。

3.2.5 硫化物的铅同位素组成

了解海底热液成矿的物质来源有助于分析流体的演化过程及其成矿机制,也是海底热液活动研究的重点之一^[24]。分析大西洋洋中脊 TAG 热液区中硫化物的 Pb 同位素组成,可见硫化物中 Pb 同位素组成变化范围小、较为均一,且大多数硫化物的 Pb 同位素比值落在了大西洋洋中脊 MORB 的 Pb 同位素组成范围内,表明上部洋壳岩石为该区硫化物的形成提供了铅。进一步研究表明,在硫化物形成过程中因其所处地质构造环境的不同,导致其铅源的不同,并引起有、无沉积物覆盖洋中脊中硫化物的 Pb 同位素组成明显的不同^[24]。

在冲绳海槽 Jade 热液区,硫化物的铅同位素组成与 TAG 热液区中硫化物的一致,均呈现出变化范围小,组成均一的特征,且其 Pb 同位素比值落在了中部冲绳海槽火山岩和沉积物的 Pb 同位素组成范围内,显示海底沉积物与长英质火山岩是该区硫化物中 Pb 的主要来源^[28]。

3.2.6 硫化物中流体包裹体的稀有气体同位素组成

热液流体中稀有气体的信息可以被很好地保存在同时期的流体包裹体中,分析热液产物中流体包裹体的稀有气体组分,有助于了解热液流体的来源、演化以及热液通量等问题^[26]。基于此,我们曾分析了大西洋洋中脊 TAG 热液区和冲绳海槽 Jade 热液区硫

化物中流体包裹体的稀有气体(He、Ne 和 Ar)同位素组成。结果表明, TAG 热液区硫化物中流体包裹体的 He 同位素比值变化范围明显大于该区喷口流体和 MORB 的。样品中 Ne 和 Ar 同位素比值的变化范围分别略高于和接近大气值的, 表明该区硫化物中流体包裹体的稀有气体来源于地幔和海水端员稀有气体的混合, 且流体包裹体中的 He 主要来自上地幔, 而海水则是其 Ne 和 Ar 的主要供给者^[26, 62]。

在 Jade 热液区, 硫化物中流体包裹体的 He 同位素比值与洋中脊玄武岩中的较为接近, 其 Ne 和 Ar 同位素比值的变化范围分别高于大气和接近大气的, 表明该区硫化物中流体捕获的稀有气体, 与 TAG 热液区类似, 也是海水和地幔源混合的结果, 且其 He 主要来自地幔, 而 Ne 和 Ar 则主要来自海水^[63]。

3.2.7 硫化物的钷含量及其同位素组成

前人研究发现海水和上部洋壳岩石具有明显不同的钷(Os)同位素组成特征。因此, 可以使用 Os 同位素组成体系来示踪海底热液活动^[64]。基于此, 我们曾分析了大西洋洋中脊 TAG 热液区和冲绳海槽 Jade 热液区中硫化物的 Os 同位素组成。结果发现, 前者硫化物的 Os 同位素比值与其他热液活动区的一致, 均落在上部洋壳岩石和现代海水的 Os 同位素组成之间, 指示该区硫化物中的 Os 主要来源于海水和上部洋壳, 且在海底热液循环过程中, 热液流体中的 Os 浓度及其同位素组成明显受到了海水混入的影响^[64-65]。

在 Jade 热液区, 硫化物的 Os 同位素比值与 TAG 热液区的不同, 介于地幔、海底沉积物和海水端员之间, 从而表明该区硫化物中的 Os 源自地幔深部与海水和/或沉积物中的 Os。结合对该区硫化物中 S 同位素、Pb 同位素以及 REE 的组成特征分析, 进一步证实 Jade 热液区中硫化物的 S、Pb、REE 和 Os 主要来自火山岩、沉积物、海水以及深部地幔^[33]。

4 浅海龟山岛热液区的自然硫烟囱体

在龟山岛热液区曾分布着一个高达 6 m 的自然硫烟囱体(水深 20 m), 之前我们曾报道过采自该烟囱体的 14 个自然硫样品的 S 同位素组成数据^[50]。进一步, 我们曾对该区的自然硫烟囱体进行了微量和 REE 组成的测定, 并结合 S 同位素组成特征分析, 探讨了烟囱体的物质来源及其形成条件。研究表明, 该区海底下流体-安山岩相互作用的时间短, 其 S 源主要是岩浆去气过程中所产生的 H₂S 和 SO₂, 而其微量

和 REE 主要来自龟山岛安山岩, 并有海水组分的加入, 是酸性流体与安山岩相互作用的结果。基于以上, 结合该区喷口流体的化学组成特征, 可知自然硫烟囱体主要形成于相对低温(< 116°C)、有氧且酸性的流体环境中^[51]。

5 羟基氧化物与热液蚀变

5.1 东太平洋海隆 13°N 的羟基氧化物

海底热液活动区中分布着 Fe-羟基氧化物, 其可呈丘状体、烟囱体以及熔岩流之间的裂隙充填物和其它不规则形态产出^[11]。我们曾通过分析 EPR 13°N 附近 Fe-羟基氧化物的矿物和化学组成, 发现其常量元素 Fe、Ca、Mg、Al 和微量元素 As、Co、Ni、Cu、Zn、Ba、Sr 的含量值均落在该区硫化物中对应元素的变化范围内, 反映该 Fe-羟基氧化物是硫化物后期发生次生氧化作用的产物, 并部分继承了原生硫化物的元素组成特征。同时, 该热液区附近 Fe-羟基氧化物的球粒陨石标准化 REE 配分模式与海水较为相似, 而与喷口流体及热液柱中悬浮物的 REE 特征明显不同, 表明海水中的 REE 是 Fe-羟基氧化物 REE 的重要来源, 暗示海底热液区中 Fe-羟基氧化物可构成海水中 REE 的一个汇。同时, Fe-羟基氧化物中 REE 含量较低和 Mn 含量偏高与热液柱颗粒物的快速沉淀有关。进一步证实了该区 Fe-羟基氧化物是有氧、低温条件下硫化物次生氧化过程的产物^[11]。

5.2 东马努斯海盆 PACMANUS 热液区的羟基氧化物

东马努斯海盆 PACMANUS 热液区中分布着 Si-Fe-Mn 氧化物和羟基氧化物。首先, 我们曾对该 Si-Fe-Mn 氧化物进行了扫描电镜和显微镜观察, 发现其呈隐晶质结构, 含有已石化的硅藻, 样品中 Fe 和 Mn 元素的分布呈现出明显的分带性, 表现为 Si-Fe 质层包裹 Si-Mn 质层的特征, 说明 Si-Fe-Mn 氧化物是多期次多阶段的产物, 且该 Si-Fe-Mn 氧化物是从富 Si、Fe 和 Mn 的低温热液流体中直接沉淀形成的^[41]。进一步, 对该热液区英安岩环境中 Si-Fe-Mn 羟基氧化物的矿物学和形态学特征进行分析, 发现其普遍具有相对较差的结晶度, 可见少量的水钠锰矿、针铁矿、绿脱石、钡镁锰矿和蛋白石-A 等矿物, 有疑似生物遗迹的存在(细丝状硅质物和空心管状物), 表明其可能受到了热液区微生物作用的影响,

进而形成了低温热液活动的产物—绿脱石。不仅如此,该区 Si-Fe-Mn 羟基氧化物的核可分为 Si 质核和 Si-Mn 质核两种类型,且 Si 质核主要是无机成因,而 Si-Mn 质核则与微生物活动有关^[42]。

此外,我们还分析了该区 Si-Fe-Mn 羟基氧化物的主量、微量和 REE 组成。结果显示,该 Si-Fe-Mn 羟基氧化物几乎没有受到火山碎屑物质的影响,其较快的生长速率,表现出明显热液成因的特征,而明显的正 Ce 异常,则可能与 Fe 羟基氧化物的吸附作用和后期成岩作用有关。同时,该 Si-Fe-Mn 羟基氧化物中较高的 Pb 含量,表明流体中的 Pb 并未完全进入早期形成的硫化物中,而是随流体喷出,其部分进入了 Si-Fe-Mn 羟基氧化物中^[39]。

5.3 东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩的热液蚀变

在海底热液循环系统中,流体-岩石发生水岩相互作用,可将有用的金属元素从岩石中淋滤出来,形成成矿流体,同时影响了近海底水体的化学组成。基于此,前人的研究工作主要是了解流体与玄武岩之间的水-岩相互作用过程以及玄武岩蚀变过程中所受到的压力、温度、岩石和流体化学组成等因素的控制,且对玄武岩蚀变过程的研究聚焦于海底面以下,而对海底表面的玄武岩蚀变研究却相对较少^[6]。

我们曾通过分析 EPR 13°N 附近的枕状玄武岩,发现其玻璃边缘和斜长石微斑晶出现轻微的化学蚀变,而辉石和橄榄石微斑晶则没有受到热液蚀变作用的影响。在流体-玻璃和/或斜长石微斑晶相互作用弱时, Si、Al、Ca 和 Na 元素在玻璃和/或斜长石微斑晶中呈现出由内向外逐渐扩散的趋势,造成元素聚集在玻璃的边缘和斜长石微斑晶外侧;在流体-斜长石微斑晶和/或玻璃相互作用程度相对较强的情况下, Si、Al、Ca 和 Na 元素与前者表现一致,但这些元素在玻璃边缘和斜长石微斑晶中的含量均相对较低^[6]。进一步,可将斜长石微斑晶和玄武质玻璃边缘的化学蚀变分别划分为 5 和 4 种类型。同时,基于流体与岩石相互作用过程中,玻璃边缘和斜长石微斑晶的含量变化,可估算出斜长石微斑晶边缘中 Si、Al 和 Fe 含量的变化率分别达到 10.69%、17.59%和 109%。类似的,玻璃边缘中 Si、Al 和 Fe 含量的变化率则分别达到 9.79%、16.30%和 37.83%^[6]。

6 含金属沉积物与富稀土元素沉积物

6.1 东太平洋海隆 13°N 附近的含金属沉积物

含金属沉积物是指受到海底热液活动影响尚未固结的深海沉积物,主要分布于海底热液活动活跃的区域,且其 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb 和 As 等元素相对富集,而 Al 和 Ti 等元素则相对亏损。特别是,研究含金属沉积物有助于揭示其记录的热液活动信息,示踪海底热液活动的特征。为此,我们曾对 EPR 13°N 附近的含金属沉积物进行了粒度分析、孔隙率变化、化学组成及其元素赋存状态的分析,结果显示距离 EPR 13°N 西翼 25~45 km 处的含金属沉积物,其 Cu、Pb、Zn、Li、Mo 和 Ni 元素相对富集,显示了该处的沉积作用受到了明显的热液柱的影响^[66]。进一步,研究 EPR 13°N 和赤道附近表层含金属沉积物中元素的赋存状态,可见靠近热液喷口附近的含金属沉积物,其金属元素(Ca、Sr 除外)主要赋存于铁锰氧化物与残留相中,且含金属沉积物在顺序淋滤过程形成的 4 个相态中,其 REE 呈 Eu 正异常的特征,也反映出其形成过程中受到了明显的热液活动影响^[67-68]。不仅如此,近喷口的含金属沉积物,与远端含金属沉积物相比,其 Fe、Cu 和 Zn 等元素相对更为富集,且具有与热液流体相似的 REE 配分模式,这表明其 REE 来源于热液流体^[17]。

6.2 浮岩气孔充填的沉积物及其与热液活动的关系

在冲绳海槽中部的伊平屋北热液活动区附近发现了大量的浮岩,其气孔发育、连通性良好,且气孔中可见沉积物沉淀。对于靠近热液区的浮岩,其所携带的沉积物能否记录热液活动信息,是否可以作为寻找海底热液活动的潜在指标,尚未确定^[30]。因此,我们曾对伊平屋北热液区附近的浮岩进行了扫描电镜观察、对充填沉积物的浮岩和去除沉积物的浮岩进行了矿物组成和微量元素对比分析。结果表明,距热液活动区近的 T3 浮岩样品,其沉积物中各元素的质量比分别为, Zn(>196 μg/g)、Pb(>101 μg/g)和 Cu(>47 μg/g)元素含量异常高,暗示浮岩气孔中的沉积物包含了热液组分,反映热液活动的信息可以被热液区附近浮岩气孔中的沉积物记录,这为在浮岩分布区寻找新的热液活动区提供了新的指标^[30]。

6.3 深海富稀土元素沉积物

深海富稀土元素(REE+Y, REY)沉积物是继海底热液硫化物、富钴结壳以及多金属结核之后,日本科学家提出的又一新的海底资源^[69]。与陆上传统的稀土矿相比,深海富稀土沉积物具有稀土元素含量高的优势。因此,进一步了解沉积物中 REY 的赋存载体和富集机制尤为必要。为此,在前人对深海富 REY 沉积物开展了大量矿物学和地球化学研究的基础上,我们曾收集了已发表的全球深海沉积物中 REY 含量数据,分析了海底富 REY 沉积物的分布,研究了 REY 在不同沉积环境下的赋存载体,进而讨论了载体中 REY 的富集机制。结果表明,太平洋和印度洋中均分布着深海富 REY 沉积物,其中西北太平洋南鸟岛附近海域的深海沉积物,其 REY 含量明显较高,显示该区是有潜力的 REY 资源分布区。此外,靠近热液喷口处的沉积物,其 REY 含量受热液活动影响较大,这可能是热液柱扩散过程中,Fe-Mn 羟基氧化物等颗粒物不断吸附海水中的 REY 形成的。与此不同,而在正常的深海富 REY 沉积物中,海水沉降物中的高磷含量及其低沉积速率是导致沉积物中 REY 含量相对较高的主要原因^[69]。

7 结论

自 20 世纪 90 年代末以来,我们曾先后对 EPR 13°N 附近的玄武岩和火山玻璃样品、东海陆架边缘玄武岩和冲绳海槽南端流纹岩中的角闪石进行了研究。在此基础上,揭示了 EPR 13°N 附近玄武岩质岩浆的演化过程,划分了 EPR 13°N 附近玄武岩中斜长石微斑晶和玄武质玻璃边缘的化学蚀变类型,明确了东海陆架边缘玄武岩质岩浆形成过程中的温度、压力和氧逸度条件,揭示了冲绳海槽南端流纹岩中角闪石的结晶环境及成因,这对深入认识洋中脊热液活动期间的蚀变过程和化学交换,明确洋中脊、东海和冲绳海槽岩浆活动的形成、演化具有重要的意义,有助于了解大陆架与弧后盆地形成演化过程的内在联系以及冲绳海槽南北差异的形成机制,评估全球洋壳蚀变过程中的整体地球化学收支情况,并可为海底热液活动的物源体系及热液产物形成机理研究提供工作基础。

在海底热液产物研究方面,我们曾进行了热液流体中 REE 对海底热液过程的示踪分析,揭示了海水对 EPR 13°N 附近热液硫化物中元素的改造情况,提出了两种新的计算热液柱温度异常值的方法,建

立了龟山岛热液区自然硫烟囱体的形成模式,并分别探讨了大西洋 TAG 热液区和冲绳海槽 Jade 热液区中热液硫化物以及龟山岛热液区自然硫烟囱体中 REE、硫、铅、钨和稀有气体的来源和演化,明确了冲绳海槽 Jade 热液区热液硫化物的形成年代,认识到热液柱颗粒物的快速沉淀导致了 EPR 13°N 附近 Si-Fe-Mn 羟基氧化物中 REE 含量较低和 Mn 含量偏高,分析了 EPR 热液硫化物的资源潜力。进一步,指出了 EPR 13°N 附近热液 Fe-羟基氧化物中元素富集的机理、海水和热液柱的物质供给情况,以及与其他海区 Fe-羟基氧化物不同的原因,论证了 PACMANUS 热液区中 Si-Fe-Mn 氧化物显微结构的形成过程, Si-Fe-Mn 羟基氧化物的成因以及 Si-Mn 质核和 Si 质核的形成过程及其与生物活动的关系,阐述了 EPR 13°N 附近热液柱和冲绳海槽热液活动对沉积作用的影响,以及含金属沉积物中的物质组成及其元素赋存状态和来源。

总之,了解洋中脊、岛弧和弧后盆地热液区中热液产物的形成背景及其化学组成特征,对于深入研究深、浅海热液活动的演化规律、流体循环及其成矿作用、物源体系以及陆上古代类似矿床和全球现代成矿作用均具有重要的意义,这有助于更深入地认识热液硫化物的成因及其形成机制以及海底热液系统中微生物与金属元素相互作用的过程。

参考文献:

- [1] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 8-492.
Zeng Zhigang. Submarine Hydrothermal Geology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 8-492.
- [2] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 等. 现代海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 48-56.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Qin Yunshan, et al. Sulfur isotopic composition of modern seafloor hydrothermal sediment and its geological significance[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(3): 48-56.
- [3] Choukroune P, Francheteau J, Hékinian R. Tectonics of the East Pacific Rise near 12°50'N: A submersible study[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 68(1): 115-127.
- [4] Hékinian R, Francheteau J, Renard V, et al. Intense hydrothermal activity at the axis of the East Pacific Rise near 13°N: Submersible witnesses the growth of a sulfide chimney[J]. Marine Geophysical Research, 1983, 6(1): 1-14.

- [5] Hékinian R, Fouquet Y. Volcanism and metallogenesis of axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13°N[J]. *Economic Geology*, 1985, 80(2): 221-249.
- [6] Zeng Zhigang, Qi Haiyan, Chen Shai, et al. Hydrothermal alteration of plagioclase microphenocrysts and glass in basalts from the East Pacific Rise near 13°N: An SEM-EDS study[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57: 1427-1437.
- [7] Crane K. Structural evolution of the East Pacific Rise axis from 13°10'N to 10°35'N: Interpretations from SeaMARC I data[J]. *Tectonophysics*, 1987, 136(1-2): 65-124.
- [8] Sinton J M, Detrick R S. Mid-ocean ridge magma chambers[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B1): 197-216.
- [9] McClain J S, Orcutt J A, Burnett M. The East Pacific Rise in cross section: a seismic model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(B10): 8627-8639.
- [10] Fouquet Y, Knott R, Cambon P, et al. Formation of large sulfide mineral deposits along fast spreading ridges: Example from off-axial deposits at 12°43'N on the East Pacific Rise[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144(1-2): 147-162.
- [11] Zeng Zhigang, Wang Xiaoyuan, Zhang Guoliang, et al. Formation of Fe-oxyhydroxides from the East Pacific Rise near latitude 13°N: Evidence from mineralogical and geochemical data[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2008, 51(2): 206-215.
- [12] Charlou J L, Bougault H, Appriou P, et al. Water column anomalies associated with hydrothermal activity between 11°40' and 13°N on the East Pacific Rise: discrepancies between tracers[J]. *Deep-Sea Research I*, 1991, 38(5): 569-596.
- [13] Zeng Zhigang, Chen Daigeng, Yin Xuebo, et al. Elemental and isotopic compositions of the hydrothermal sulfide on the East Pacific Rise near 13°N[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(2): 253-266.
- [14] Wang Xiaoyuan, Zeng Zhigang, Qi Haiyan, et al. Fe-Si-Mn-oxyhydroxide Encrustations on Basalts at East Pacific Rise near 13°N: An SEM-EDS Study[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13(6): 917-925.
- [15] Barrett T J, Taylor P N, Lugowski J. Metalliferous sediments from DSDP Leg 92: The East Pacific Rise transect[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(9): 2241-2253.
- [16] 曾志刚, 张维, 荣坤波, 等. 东太平洋海隆热液活动及多金属硫化物资源潜力研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 938-946.
- Zeng Zhigang, Zhang Wei, Rong Kunbo, et al. Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide resources potential in the East Pacific Rise[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 938-946.
- [17] 荣坤波, 曾志刚, 武力, 等. 东太平洋海隆 13°N 表层含金属沉积物物质组成与元素赋存状态[J]. *海洋科学*, 2018, 42(7): 70-79.
- Rong Kunbo, Zeng Zhigang, Wu Li, et al. Composition and element occurrence states of recent metalliferous sediments from the East Pacific Rise at 13°N[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(7): 70-79.
- [18] Meyer P S, Bryan W B. Petrology of basaltic glasses from the TAG segment: Implications for a deep hydrothermal heat source[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(23): 3435-3438.
- [19] 曾志刚, 翟世奎, 赵一阳, 等. 大西洋中脊 TAG 热液活动区中热液沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 59-66.
- Zeng Zhigang, Zhai Shikui, Zhao Yiyang, et al. Rare earth element geochemistry of hydrothermal sediment from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(3): 59-66.
- [20] Thompson G, Humphris S E, Schroeder B, et al. Active vents and massive sulfides at 26°N (TAG) and 23°N (Snakepit) on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1988, 26(3): 697-711.
- [21] Rona P A, Klinkhammer G, Nelsen T A, et al. Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Nature*, 1986, 321(6065): 33-37.
- [22] 曾志刚, 秦蕴珊, 赵一阳, 等. 大西洋中脊 TAG 热液活动区中海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(5): 518-529.
- Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhao Yiyang, et al. Sulfur isotopic composition of seafloor surface hydrothermal sediments in the TAG hydrothermal field of Mid-Atlantic Ridge and its geological implications[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(5): 518-529.
- [23] Rona P A, Hannington M D, Raman C V, et al., Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 1989-2017.
- [24] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 大西洋中脊海底表层热液沉积物的铅同位素组成及其地质意义[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(1): 103-109.
- Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui. Lead isotope compositions of seafloor surface hydrothermal sediments in the TAG hydrothermal field of Mid-Atlantic Ridge and its geological implications[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(1): 103-109.
- [25] Lalou C, Reyss J L, Brichet E, et al. Hydrothermal activity on a 10⁵-year scale at a slow-spreading ridge,

- TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge 26°N[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B9): 17855-17862.
- [26] Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui, He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in hydrothermal sulfides from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 3(44): 221-227.
- [27] Jin Xianglong, Yu Puzhi. Structure and tectonic evolution of Okinawa Trough[J]. *Science in China (Series B)*, 1988, 31(5): 614-623.
- [28] 曾志刚, 蒋富清, 翟世奎, 等. 冲绳海槽 Jade 热液活动区块状硫化物的铅同位素组成及其地质意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 239-245.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Zhai Shikui, et al. Lead isotopic compositions of massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough and its geological implications[J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 239-245.
- [29] 陈祖兴, 曾志刚, 王晓媛, 等. 冲绳海槽南部流纹岩中角闪石的化学特征及其对岩石成因的指示[J]. *海洋学报*, 2017, 39(12): 74-89.
Chen Zuxing, Zeng Zhigang, Wang Xiaoyuan, et al. Geochemical characteristic of amphiboles in the rhyolite from the southern Okinawa Trough, and its implication for petrogenesis[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(12): 74-89.
- [30] 张玉祥, 曾志刚, 殷学博, 等. 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 102-111.
Zhang Yuxiang, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. 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[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 102-111.
- [31] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 等. 冲绳海槽中部 Jade 热液活动区中块状硫化物的稀土元素地球化学特征[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 244-249.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Qin Yunshan, et al. Rare earth element geochemistry of massive sulphides from the Jade hydrothermal field in the central Okinawa Trough[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 244-249.
- [32] Lee C S, Shor G G, Bibee L D, et al. Okinawa Trough: Origin of a back-arc basin[J]. *Marine Geology*, 1980, 35(1/3): 219-241.
- [33] 曾志刚, 翟世奎, 杜安道. 冲绳海槽 Jade 热液区海底块状硫化物的 Os 同位素组成[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(4): 407-413.
Zeng Zhigang, Zhai Shikui, Du Andao. Os isotopic compositions of seafloor massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 34(4): 407-413.
- [34] Kinoshita M, Yamano M. Hydrothermal regime and constraints on reservoir depth of the Jade site in the mid-Okinawa Trough inferred from heat flow measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997, 102(B2): 3183-3194.
- [35] 曾志刚, 蒋富清, 翟世奎, 等. 冲绳海槽中部 Jade 热液活动区中海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义[J]. *海洋学报*, 2000, 22(4): 74-82.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Zhai Shikui, et al. Sulfur isotopic compositions of seafloor hydrothermal sediment from the Jade hydrothermal field in the central Okinawa Trough and its geological significance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(4): 74-82.
- [36] Kawagucci S, Chiba H, Ishibashi J, et al. Hydrothermal fluid geochemistry at the Iheya North field in the mid-Okinawa Trough: Implication for origin of methane in subseafloor fluid circulation systems[J]. *Geochemical Journal*, 2011, 45(2): 109-124.
- [37] 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.
- [38] 李乃胜. 冲绳海槽地热[M]. 青岛: 青岛出版社, 1995.
Li Naisheng. *The Geothermal of Okinawa Trough*[M]. Qingdao: Qingdao Press, 1995.
- [39] 杨宝菊, 曾志刚, 殷学博, 等. PACMANUS 热液区 Fe-Si-Mn 羟基氧化物的成因及地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 69-80.
Yang Baoju, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. The origin and geochemical characteristics of Fe-Si-Mn oxyhydroxides at PACMANUS hydrothermal field[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(3): 69-80.
- [40] Sinton J M, Ford L L, Chappell B, et al. Magma genesis and mantle heterogeneity in the Manus Back-arc Basin, Papua New Guinea[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(1): 159-195.
- [41] 欧阳荷根, 曾志刚, 张国良, 等. PACMANUS 热液区 Si-Fe-Mn 氧化物的显微结构特征及意义[J]. *海洋科学*, 2010, 34(8): 69-75.
Ouyang Hegen, Zeng Zhigang, Zhang Guoliang, et al. Microstructure of the Si-Fe-Mn oxide from the PACMANUS hydrothermal field and its implications[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(8): 69-75.
- [42] Zeng Zhigang, Chen Shuai, Wang Xiaoyuan, et al. Mineralogical and micromorphological characteristics of Si-Fe-Mn oxyhydroxides from the PACMANUS hydrothermal field, Eastern Manus Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(12): 2039-2048.
- [43] Binns R A, Barriga F J A S, Miller D J. Leg 193 synthesis: Anatomy of an active felsic-hosted hydrothermal

- system, Eastern Manus Basin, Papua New Guinea[C]// BARRIGA F J A S, BINNS R A, MILLER D J. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX: Texas A&M University, 2007, 1-71.
- [44] REEVES E P, SEEWALD J S, SACCOCCIA P, et al. Geochemistry of hydrothermal fluids from the PACMANUS, northeast Pual and Vienna Woods hydrothermal fields, Manus basin, Papua New Guinea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(4): 1088-1123.
- [45] CHEN Changhua, LEE Typhoon, SHIEH Yuchning, et al. Magmatism at the onset of back-arc basin spreading in the Okinawa Trough[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69(3-4): 313-322.
- [46] CHEN Yuegan, WU Wenshoung, CHEN Chenghong, et al. A date for volcanic eruption inferred from a siltstone xenolith[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 869-873.
- [47] 王晓媛, 曾志刚, 陈帅, 等. 我国台湾东北部龟山岛附近海域热液流体中的稀土元素组成及其对浅海热液活动的指示[J]. *科学通报*, 2013, 58(19): 1874-1883. Wang Xiaoyuan, Zeng Zhigang, Chen Shuai, et al. Rare earth elements in hydrothermal fluids from Kueishantao, off northeastern Taiwan: Indicators of shallow-water, sub-seafloor hydrothermal processes[J]. *China Science Bull*, 2013, 58(19): 1874-1883.
- [48] CHEN Chentung Arthur, WANG Bingye, HUANG Jungfu, et al. Investigation into extremely acidic hydrothermal fluids off Kueishan Tao, Taiwan, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24: 125-133.
- [49] YANG Tsanyao Frank, LAN Tefang, LEE Hsiao Fen, et al. Gas compositions and helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications[J]. *Geochimical Journal*, 2005, 39(5): 469-480.
- [50] CHEN Chentung Arthur, ZENG Zhigang, KUO Fuwen, et al. Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan[J]. *Chemical Geology*, 2005, 224(1-3): 69-81.
- [51] ZENG Zhigang, LIU Changhua, CHEN Chentung Arthur, et al. Origin of a native sulfur chimney in the Kueishantao hydrothermal field, offshore northeast Taiwan[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, 50(11), 1746-1753.
- [52] ZENG Zhigang, CHEN Chentung Arthur, YIN Xuebao, et al. Origin of native sulfur ball from the Kueishantao hydrothermal field offshore northeast Taiwan-Evidence from trace and rare earth element composition[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(2): 661-671.
- [53] 曾志刚, 张松梅, 常丽华. 东海陆架边缘北部玄武岩的矿物及化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 47-52.
- Zeng Zhigang, Zhang Songmei, Chang Lihua. Mineralogical and chemical characteristics of basalts from the northern margin of the continental shelf in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 47-52.
- [54] 赵慧静, 曾志刚, 殷学博, 等. 东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩微量元素特征[J]. *海洋科学*, 2014, 38(4): 61-70. Zhao Huijing, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Characteristic of trace element in mid-ocean ridge basalts near the East Pacific Rise 13°N[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(4): 61-70.
- [55] BAKER E T, LUPTON J E. Changes in submarine hydrothermal 3He/heat ratios as an indicator of magmatic tectonic activity[J]. *Nature*, 1990, 346(6284): 556-558.
- [56] WANG Xiaoyuan, ZENG Zhigang, LIU Changhua, et al. Geochemical anomalies of hydrothermal plume at EPR 13°N[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1433-1440.
- [57] McDougall T J. Bulk properties of "hot smoker" plumes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 99(1-2): 185-194.
- [58] 王晓媛, 武力, 曾志刚, 等. 海底热液柱温度异常自动化计算方法探讨[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 185-191. Wang Xiaoyuan, Wu Li, Zeng Zhigang, et al. Automatic calculation on the temperature anomaly of a marine hydrothermal plume[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 185-191.
- [59] 曾志刚, 余少雄, 殷学博, 等. 冲绳海槽 Jade 热液区热液硫化物的元素富集与铀系同位素组成[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1579-1590. Zeng Zhigang, Yu Shaoxiong, Yin Xuebo, et al. Element enrichment and U-series isotopic characteristics of the hydrothermal sulfides at Jade site in the Okinawa Trough[J]. *Science China Series D-Earth Science*, 2009, 39(11): 1579-1590.
- [60] 曾志刚, 翟世奎, 秦蕴珊, 等. 现代海底热液沉积物中硫化物集合体和其单矿物之间的硫同位素关系及其意义[J]. *海洋科学*, 2000, 24(5): 31-33. Zeng Zhigang, Zhai Shikui, Qin Yunshan, et al. The sulfur-isotopic relations between bulk and single sulfides in the modern seafloor hydrothermal sediment and its implications[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(5): 31-33.
- [61] ZENG Zhigang, MA Yao, CHEN Shuai, 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.
- [62] ZENG Zhigang, NIEDERMANN S, CHEN Shuai, et al. Noble

- gases in sulfide deposits of modern deep-sea hydrothermal systems: Implications for heat fluxes and hydrothermal fluid processes[J]. *Chemical Geology*, 2015, 409: 1-11.
- [63] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 冲绳海槽 Jade 热液区块状硫化物中流体包裹体的氦、氩、氙同位素组成[J]. *海洋学报*, 2003, 25(4): 36-42.
- Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui, He, Ne and Ar isotopic compositions of fluid inclusions in massive sulfides from the Jade hydrothermal field, Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(4): 36-42.
- [64] 曾志刚, 翟世奎, 杜安道. 大西洋洋中脊 TAG 热液区中块状硫化物的 Os 同位素研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 394-398.
- Zeng Zhigang, Zhai Shikui, Du Andao. Os isotopic compositions of seafloor massive sulfides from the TAG hydrothermal field in the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Acta Sedimentology Sinica*, 2002, 20(3): 394-398.
- [65] Zeng Zhigang, Chen Shuai, Selby D, et al. Rhenium-osmium abundance and isotopic compositions of massive sulfides from modern deep-sea hydrothermal systems: Implications for vent associated ore forming processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 396: 223-234.
- [66] 袁春伟, 曾志刚, 殷学博, 等. 东太平洋海隆 13°N 附近沉积物岩心地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(4): 45-53.
- Yuan Chunwei, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Sediment geochemistry from 13°N East Pacific Rise hydrothermal field[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(4): 45-53.
- [67] 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.
- [68] 曾志刚. 东太平洋海隆热液地质[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Zeng Zhigang. *Submarine Hydrothermal Geology in the East Pacific Rise*[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [69] 杨娅敏, 曾志刚, 殷学博, 等. 深海富 REY 泥中稀土元素赋存载体及其富集机制研究进展[J]. *海洋科学*, 2019, 43(8): 93-107.
- Yang Yamin, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Advances in research on the host and the enrichment mechanism of REY-rich mud in deep-sea Sediments[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(8): 93-107.

Seafloor hydrothermal activities and their geological environments and products

ZENG Zhi-gang^{1, 2, 3, 4, 5}, CHEN Zu-xing^{1, 2, 5}, ZHANG Yu-xiang^{1, 2, 5},
YANG Ya-min^{1, 2, 4}, LI Xiao-hui^{1, 2, 5}, QI Hai-yan^{1, 2, 3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Mar. 16, 2020

Key words: hydrothermal environment; hydrothermal products; vent fluid; element circulation

Abstract: In the past 23 years, we have realized that the seafloor hydrothermal activities mainly distributed in the mid-ocean ridge, back-arc basin island arc and hot-spot environments, with various types of host rocks, including ultramafic, mafic, felsic rocks, and sediments. The hydrothermal activity has experienced magmatic degassing, fluid-rock and/or sediment interaction and fluid-seawater mixing, obtaining materials from magma, rock, seawater and sediment, forming hydrothermal circulation, producing vent fluid with high temperature, low oxygen, high or low pH value, high Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Hg, As concentrations, gases (methane, hydrogen), and other components, affecting the seawater, sediment, rock and biological environment, building the submarine hydrothermal system, and at the same time, hydrothermal products such as hydrothermal plume, sulfide and sulfate, metalliferous sediments and altered rocks were formed in the seafloor hydrothermal fields. In the future, the development of hydrothermal detection equipment and hydrothermal product analytical techniques, and the continuous observation of hydrothermal alteration rocks, vent fluids, hydrothermal plumes, sulfide and sulfate chimneys, metalliferous sediments, hydrothermal circulation and biological activities in the seafloor hydrothermal vent fields will undoubtedly provide work support for human beings to understand the subseafloor geological process and life activities, and protect the seafloor hydrothermal environment.

(本文编辑: 刘珊珊)