

我国海底热液活动研究的阶段性进展与展望*

曾志刚^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071;
3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 海底热液活动调查研究是深海进入、深海探测和深海开发的切入点之一。近十年来, 中国在西太平洋弧后盆地、东太平洋海隆、大西洋洋中脊和印度洋脊, 发现了一批新的海底热液活动区, 围绕着热液活动区的硫化物、流体、热液柱、生物等热液产物开展了调查研究, 构建了海底热液地质学, 提出了热液活动、冷泉及天然气水合物的同源异汇假说, 出版了《海底热液地质学》、《现代海底热液硫化物成矿地质学》、《现代海底热液活动》、《东太平洋海隆热液地质》专著, 获得了一批调查研究成果。未来, 聚焦海底热液活动的深部过程及其资源环境效应关键问题, 发展海底热液活动探测技术, 拓展极地海底热液活动调查研究新领域, 围绕烟囱体、热液柱、含金属沉积物、流体以及热液区生物等热液产物, 开展深入、系统的调查研究工作, 无疑将推动海底热液地质学取得新的进展。

关键词 海底热液活动; 深海研究; 探测技术; 未来发展

中图分类号 P736.4 **doi:** 10.11693/hyhz20210400097

矿产资源是国民经济的重要物质基础, 是国家现代化建设和社会发展的重要战略资源, 是主权国家综合国力的基本构成。进入 21 世纪, 矿产资源的供需矛盾日益突出, 正对人类社会、经济的可持续发展产生深刻影响。

海底热液活动不仅是深海研究的切入点之一, 其形成的多金属硫化物堆积体富含铜、锌、金和银等有用元素, 资源量达 6×10^8 t, 既是智能手机、电动汽车等产业发展不可或缺的元素, 也是重要的海底战略性关键矿产资源。同时, 我国因人口众多也是一个铜、金等资源需求量极大的发展中国家, 掌握海底多金属硫化物资源状况, 无疑将是我国陆域矿产资源的重要补充和战略接替。

要掌握海底多金属硫化物资源状况, 首先需要认识硫化物的成矿机理和分布规律, 然而探测海底热液活动及其硫化物资源有难度, 有关它们的形成过程和流体条件等问题长期存在争议, 更缺少对硫

化物等热液产物中元素赋存状态及其来源的深入了解, 不清楚岩浆活动、流体-岩石相互作用、沉积物和海水等因素对硫化物的形成和保存的多重约束, 这严重制约了对海底硫化物形成条件、形成过程和资源潜力的认识。

为此, 开展海底热液活动及其硫化物资源调查研究, 已成为国内外的共识及长期持续付诸实施的重要工作内容。目前, 一方面国际上正处于竞相争夺海底硫化物资源的局面, 西方国家、日韩及国际矿业公司对硫化物资源已呈垄断态势, 开采利用海底硫化物资源已不再是遥远的梦。同时, 在南太平洋的岛弧、东太平洋加拉帕戈斯裂谷、东北太平洋胡安德富卡洋脊、东太平洋海隆、大西洋洋中脊、中印度洋脊和西南太平洋弧后盆地, 围绕海底热液活动及其多金属硫化物资源, 国外科学家已分别开展了热液烟囱体的 3 维(3 dimension, 3D)可视模拟, 以及热液产物的矿物、元素和同位素组成研究, 分析了烟囱体的

* 国家自然科学基金项目, 91958213 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDB42020402 号; 全球变化与海气相互作用专项, GASI-GEOGE-02 号; 中国科学院国际合作局对外合作重点项目, 133137KYSB20170003 号; 大洋“十三五”深海资源潜力评估项目, DY135-G2-1-02 号; 泰山学者工程专项, ts201511061 号; 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目, 2013CB429700 号。曾志刚, 研究员, E-mail: zgzheng@qdio.ac.cn

收稿日期: 2021-04-19, 收修改稿日期: 2021-05-27

生长阶段、热液柱的物质组成和生物活动的特征,使用海底观测网络观测了活动的海底热液系统,使用3D打印技术进行了烟囱体结构的重构等多方面的研究工作,而我国对洋中脊,特别是弧后盆地硫化物资源的分布规律及其资源量的了解相对薄弱。因此,掌握海底硫化物资源状况,事关我国能否在海底矿产资源竞争中占有一席之地,对增加我国战略铜、金等资源储备、维护国家海洋权益非常重要。另一方面,持续长期开展此项工作,有利于掌握海底热液活动分布规律,认识洋中脊和弧后盆地的构造、岩浆作用与热液循环及其成矿的关系(Tao *et al.*, 2020),揭示海底热液活动对海水、沉积和生态环境的影响状况,这将了解流体作为桥梁的跨圈层动力过程与物质能量循环这一重大科学问题,占领深海科学研究制高点,服务于海底硫化物资源调查、热液生态环境保护等重大需求提供工作基础(曾志刚, 2020)。

1 调查发现新的海底热液活动区,研究其分布规律

在过去的十年,我国已在西太平洋、东太平洋海隆、南大西洋洋中脊和印度洋脊发现了一批新的海底热液活动及其硫化物分布区,研究了海底热液活动的分布规律及其成矿机理(李家彪, 2017; 栾锡武, 2017; 图1)。其中,自2007年以来,中国共有4个大洋航次在西南印度洋脊进行了硫化物调查研究,发现了8个热液喷口。2008年DY115-20航次在西南印度洋脊,用摄像拖体和电视抓斗发现了断桥(Duanqiao)热液区。2010年在西南印度洋脊,用摄像拖体发现了玉皇山(Jade Emperor Mountain)热液区。同时,指出了在未来的硫化物调查中,应着重研究西南印度洋脊硫化物成矿的控制因素、隐伏和非活动硫

化物堆积体的找矿方法、硫化物资源评价方法以及近底的硫化物调查技术体系(Tao *et al.*, 2014)。明确了中国在西南印度洋脊的合同区(47°—51°E)具最高的后验概率值,可选择作为补充勘探的保留区,并通过缩小勘探范围,提高勘探精度,为海底热液硫化物资源的勘探提供重点工作区域(Ren *et al.*, 2016)。

2012年,中国在西北印度洋的 Carlsberg 洋脊 3.5°—3.8°N 和北大西洋洋中脊 4°—7°N 又分别发现了新的海底热液活动区,填补了我国在该海区热液活动调查研究的空白(Tao *et al.*, 2013a)。2015年,中国大洋航次在西南印度洋脊的第27段,使用拖体,进行了详细的调查,在85 km长的洋脊段上识别出9个热液区,并指出即使在受热点影响的超慢速扩张洋脊上,通过系统调查也有望发现更多的热液活动(Yue *et al.*, 2019)。此外,2008年,在东太平洋海隆 1.4°S 和 2°S, 用摄像拖体发现了新热液活动区。2009年,在南大西洋洋中脊,用摄像拖体发现了 Rainbow Bay 和周琉脊(Zouyu Ridge)热液区;在加拉帕戈斯(Galapagos)裂谷,用摄像拖体和电视抓斗发现了宝石山(Precious Stone Mountain)热液区。随后,2012年,在南大西洋洋中脊,用电视抓斗发现了德音(Deyin)-1热液区。2014年,又在西太平洋的弧后盆地冲绳海槽发现了唐印热液活动区(Zeng *et al.*, 2017a)。

2 海底热液活动及其产物研究

2.1 硫化物等热液产物研究

在调查发现新的海底热液活动区,研究其分布规律的基础上,中国学者已对印度洋脊、南大西洋洋中脊、东太平洋海隆和西太平洋弧后盆地的硫化物等热液产物开展了分析工作(表1)。在印度洋脊,先后研究了块状硫化物与烟囱体等热液产物的结构、矿物

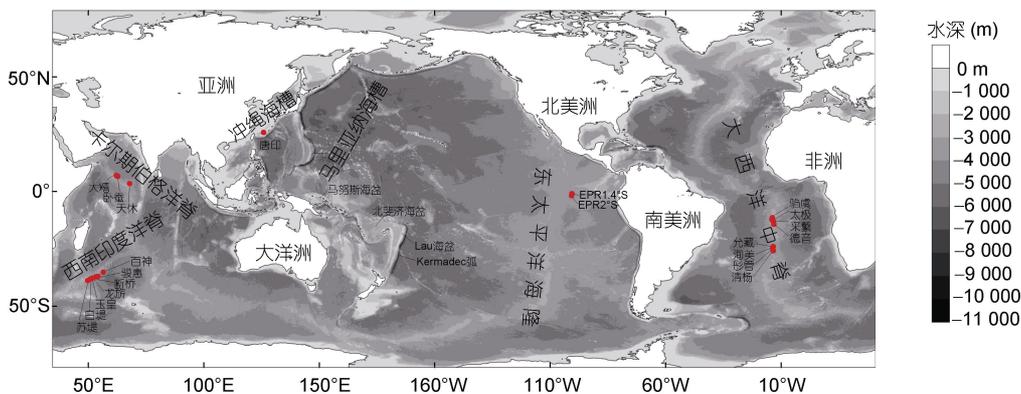


图1 我国调查发现的海底热液区(红点)

Fig.1 Distribution of seafloor hydrothermal fields discovered by China seafloor scientific exploration (red point)

表 1 洋中脊与弧后盆地海底热液产物的对比及其形成条件
Tab.1 Comparison and formation conditions of seafloor hydrothermal products

分布	类型	主要矿物	富集元素	基底岩石	物质来源	控制因素
印度洋脊	烟囱体、块状硫化物	黄铁矿, 闪锌矿, 黄铜矿, 重晶石, 硬石膏, Fe-羟基氧化物	Fe, Zn, Cu, Au, Ag	玄武岩	火山岩, 海水	流体-岩石相互作用 流体-海水混合作用; 生物作用
大西洋洋中脊	烟囱体、块状硫化物	黄铜矿, 闪锌矿, 黄铁矿, Fe-Si-Mn 羟基氧化物	Cu, Zn, Au	玄武岩, 橄榄岩	火山岩, 海水	流体-岩石相互作用; 流体-海水混合作用; 生物作用
东太平洋海隆	烟囱体、块状硫化物	黄铁矿, 闪锌矿, 黄铜矿, Fe-Si-Mn 羟基氧化物	Fe, Zn, Cu, Au, Ag	玄武岩	火山岩, 海水	流体-岩石相互作用; 流体-海水混合作用; 生物作用
西太平洋弧后盆地	烟囱体、块状硫化物	闪锌矿, 方铅矿, 黄铜矿, 黄铁矿, 重晶石, 硬石膏, Fe-Si-Mn 羟基氧化物	Zn, Pb, Cu, Au, Ag	玄武岩, 安山岩, 英安岩, 流纹岩	火山岩, 沉积物, 岩浆, 海水	流体-岩石/岩浆相互作用; 流体-沉积物相互作用; 流体-海水混合作用; 生物作用

和地球化学组成, 使用 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 测年法对硫化物进行分析, 探讨了表层含金属沉积物中的矿物来源; 测量了硫化物、玄武岩和橄榄岩的物理性质(磁化率、电阻率、孔隙度、密度以及声波波速), 建立了海底块状硫化物找矿预测模型。其中, 在西南印度洋脊的 $49^{\circ}39'\text{E}$ 热液区, 指出了该区烟囱体的特征与东太平洋海隆和大西洋洋中脊上的相似, 其平均金(Au)、银(Ag)含量分别高达 2.0 和 70.2 $\mu\text{g/g}$, 高于洋中脊大部分热液区中块状硫化物的。同时, 硫化物烟囱体的稀土元素组成特征与贫沉积物覆盖洋中脊热液区中硫化物的明显不同, 其轻稀土元素富集, 呈弱或负 Eu 的异常, 这归因于该区特殊的成矿环境或流体组成 (Tao *et al.*, 2011)。随后, 在 49.6°E 的龙旂(Longqi)热液区, 发现了块状硫化物富含金, 低温富锌硫化物中 Au 的显著富集以及热液产物中锌和铁的有效分离, 揭示了 Au 在热液流体中的迁移和沉淀, 且块状硫化物的 Au 纯度较低, 表明硫的活度可能是影响块状硫化物中 Au 纯度的主要因素之一 (Ye *et al.*, 2012)。进一步, 指出了硫化物与岩石之间的物理差异, 并讨论了热液蚀变对基岩的影响, 阐述了岩石的物理性质如何有助于海底热液区的地球物理勘探, 这对于深入开展热液活动研究, 特别是海底硫化物的找矿工作具有重要意义 (Tao *et al.*, 2013b)。不仅如此, 在断桥热液区, 中国学者揭示该区的热液活动经历了 4 个阶段 (68.9—84.3, 43.9—48.4, 25.3—34.8 和 0.7—17.3 ka), 烟囱体的平均生长速率小于 0.02 mm/a, 且该区硫化物的矿石量约为 0.5×10^6 — 2.9×10^6 t (Yang *et al.*, 2017)。随后, 在龙旂-1 热液区, 证实该区的热液活动至少具~100 ka 的历史, 且在 1.2—3.0 ka 间, 硫化物沉淀的速率很快 (Liang *et al.*, 2018)。不仅如此, 在 49.6°E 的龙旂热液区, 发现富铅、砷、镍、钡、锰、

钼、铀、钒的微细浸染状他形硫化物形成于烟囱体壁生长的初期, 而富锡、硒、钴的块状粗粒自形硫化物则形成于热液成矿后期, 且在烟囱体生长过程中, 热液流体的化学组成发生了很大的变化。进一步, 证实烟囱体作为海底热液活动的产物, 可以用来了解块状硫化物堆积体的形成过程及其记录的流体演化 (Yuan *et al.*, 2018)。同时, 在龙旂和断桥热液区, 指出海底热液成矿过程可分别分为 3 和 2 个阶段。明确了龙旂和断桥热液区闪锌矿中的细粒黄铜矿包裹体分别是由共沉淀机制和交代作用形成的, 不同世代黄铁矿和黄铜矿中锌含量的变化可能是区域精炼过程 (zone refining process) 的结果, 龙旂热液区的流体温度可能比断桥的高, 氧逸度和硫逸度值相对较低, 且与前者相比, 后者受围岩成分的影响较大 (Zhang *et al.*, 2018a)。不仅如此, 还首次报道了断桥和玉皇 (Yuhuang) 热液区硫化物中汞 (Hg) 的含量和同位素组成, 明确其硫化物中的 Hg 含量较高, 是 Hg 在深海环境的一个重要汇, 且断桥热液区中硫化物的 Hg 主要来自岩浆/地幔 Hg, 而玉皇热液区中硫化物的 Hg 主要来自岩浆/地幔和海水 Hg 的混合物 (Zhu *et al.*, 2020a)。此外, 在 49.6°E 热液区, 发现了表层含金属沉积物中的辉石、蛇纹石、磁铁矿、闪锌矿、方解石和重晶石是海底基岩风化和热液活动的产物, 且沉积物中的硫化物颗粒主要来自热液柱 (Zhang *et al.*, 2020a)。

在中印度洋脊, 研究了 Edmond 热液区热液产物样品中的 Au 和 Ag。发现多个富锌烟囱体碎片和以硬石膏为主的热液产物样品中, 其贵金属含量高于富铁铜块状硫化物和富硅热液沉淀物的。天然 Au 颗粒主要与闪锌矿、硬石膏、重晶石以及 Fe-羟基氧化物伴生, 大量的亚显微 Au-Ag 合金倾向于沿铜铁硫化物与砷黝铜矿的颗粒边界分布, 或靠近贫铁闪锌矿

颗粒的边缘,且在流体与海水混合冷却,导致富锌矿物沉淀后,产生了二次 Au 富集。明确该热液区长期的高温热液活动导致了热液改造普遍存在,并指出热液产物产生后经历的表生过程对早期形成的贵金属的再活化和局部再富集非常重要,可能是在重结晶块状硫化物和烟囱体碎片中形成相对粗粒自然 Au 或 Ag 的原因(Wu *et al.*, 2016b),以上研究有助于确定海底热液产物中贵金属分布的控制因素。随后,研究发现在水深约 2 450 m,以超镁铁质火成岩为围岩的 Kairei 热液区,黄铁矿中硒、碲和铋含量的变化很可能受强烈的流体温度梯度控制,且超镁铁质热液体系中的蛇纹石化作用对低砷黄铁矿中 Au 的富集起重要作用。明确了控制硫化物中硒富集的主要因素是喷口流体的温度,这为了解硫化物中微量元素的分布,以及控制这些矿物中微量元素分布的因素提供了支撑(Wang *et al.*, 2018b)。此外,在西北印度洋 Carlsberg 洋脊的卧蚕(Wocan)热液区,分布着四类热液产物:(1)富铜烟囱体;(2)富铜块状硫化物;(3)富铁块状硫化物;(4)硅化块状硫化物。其中,热液产物的晚期矿物组合中显著的 Ag 富集可能与流体低温和 pH 值升高有关(Wang *et al.*, 2017d)。

在南大西洋洋中脊,研究了硫化物和烟囱体的矿物组成和地球化学特征,分析了烟囱体中的有机质组成。其中,在南大西洋洋中脊 26°S 热液区,硫化物堆积体可能起源于玄武岩与热液流体的相互作用,并通过玄武岩与热液流体的相互作用聚集了分散的成矿元素,致使硫化物具高铁、低锌含量的特征(Fan *et al.*, 2014)。在南大西洋洋中脊 15°S 附近的德音(Deyin)-1 热液区,硫化物可分为富铁硫化物、富铁铜硫化物和富铁锌硫化物三种类型,且硫化物中的稀土元素来源相同,但其经历了不同的迁移或富集过程。与其他热液区的硫化物相比,其具 Zn 含量明显偏高,Cu 含量相对偏低的特点,这为了解成矿元素的富集规律和热液成矿作用提供了研究支撑(Wang *et al.*, 2017a, b)。此外,在南大西洋洋中脊的德音热液区,烟囱体中完整的极性甘油二烷基甘油四醚脂(GDGTs)较烟囱体核心的 GDGTs 丰富,且烟囱体中完整的极性类异戊二烯 GDGT-0 是主要的成分(>70%的类异戊二烯 GDGTs),这表明有嗜热性广古菌门古菌的输入,且大多数的 GDGTs 可能起源于原位的嗜热细菌(Li *et al.*, 2018a)。

在东太平洋海隆,中国学者研究了 9°—10°N 洋脊段之间的 L 喷口烟囱体,发现该烟囱体中分布着硬

石膏,Sr 同位素组成显示其为热液流体和海水混合的产物,且烟囱体中硬石膏的稀土元素(rare earth element, REE)球粒陨石标准化配分模式,呈现轻稀土元素(light rare earth element, LREE)富集, Eu 正异常的特征(Yao *et al.*, 2015)。

在东北太平洋,研究表明热液柱移动路径下方的含金属沉积物中记录了热液柱的扩散过程。其中,在胡安德富卡(Juan de Fuca)洋脊的 Endeavour 段的翼部,热液流体通过热液柱对含金属沉积物贡献了一定比例的铁锰氧化物(占整体沉积物的 4.51%—7.17%),使其明显富集热液来源铝、钙和一些微量元素,且活性铁和锰在沉降过程中的解耦行为以及随后在含金属沉积物中的早期成岩作用,为未来有关元素的归宿及其在海洋收支的研究提供了有价值的启示(Sun *et al.*, 2018)。

在西太平洋的弧后盆地,研究了 Lau 海盆和冲绳海槽的烟囱体、含金属沉积物和重晶石等热液产物。其中,在 Lau 海盆的中国大洋协会探索(COMRA discovery expedition, CDE)热液区,分布着大量、松散的 Fe-Si-Mn 羟基氧化物和小的富硅氧化物烟囱体,对该烟囱体进行了矿物学和地球化学分析,建立了烟囱体的生长模型(Sun *et al.*, 2012)。研究了 Lau 海盆瓦卢法脊热液区中铁硅氧化物的矿物学特征,特别是分析了嗜中性铁氧化细菌在铁硅氧化物形成中的作用。指出太古宙海洋中可能不存在原始的交替富硅和富铁层,且条带状含铁建造(banded iron formations, BIF)中的交替条带代表了一个成岩过程,这为揭示前寒武纪 BIF 的沉淀和成岩机制提供了一个潜在的线索(Sun *et al.*, 2013)。

在冲绳海槽,为了认识其南部的热液成矿环境及其物质来源,研究了唐印热液区含金属沉积物的矿物和硫同位素组成特征,指出岩浆 H₂S 的加入可能是唐印热液区含金属沉积物具低硫同位素组成特征的最可能原因(Yang *et al.*, 2020)。同时,利用电子探针和 LA-MC-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer)分别测定了冲绳海槽 Yonaguni IV 热液区中重晶石的元素含量和 Sr 同位素组成,讨论了热液循环过程中流体与沉积物的相互作用及重晶石结晶的物理化学条件,指出沉积物在热液成矿过程中起着关键作用,且沉积物组分在重晶石结晶和硫化物矿化之前进入了海底热液系统(Zhang *et al.*, 2020b)。

不仅如此,中国学者还先后开展了硫化物等热

液产物的铼(Re)、锇(Os)、稀有气体、硫(S)、铅(Pb)、铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)同位素以及 REE 组成研究。其中, 在热液硫化物的 Re 和 Os 同位素组成方面, 分析了东太平洋海隆(East Pacific Rise, EPR)、大西洋洋中脊(Mid-Atlantic Ridge, MAR)、中印度洋脊(Central Indian Ridge, CIR)、西南印度洋脊(Southwest Indian Ridge, SWIR)和弧后盆地(Back-Arc Basin, BAB)中不同热液区 38 个块状硫化物样品的 Re 和 Os 含量及其同位素组成, 明确大多数硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值, 其范围很窄(1.004—1.209), 反映其 Os 来自于海水, 且在低温(<200 °C)条件下富集。同时, 指出海水与热液流体混合形成的古海底热液硫化物矿床的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值可用于示踪古海水的 Os 同位素组成。此外, 估计现代海底硫化物堆积体含有约 0.6—44 t 的 Re 和 1—48 kg 的 Os, 且全球低温热液流体的 Os 通量约为 11 kg/a(Zeng *et al.*, 2014)。进一步研究了中印度洋脊 Edmond 和 Kairei 热液区中块状硫化物堆积体的铂族元素(platinum group element, PGE)和 Os 同位素组成, 指出该区的富 Cu 硫化物与基性-超基性岩有关, 具较高的 PGE 含量(平均达 8.98 ng/g)。在 Edmond 热液区, 胶状闪锌矿中存在着自然 Au, 其 Pd 分馏与高温流体条件下黄铜矿的沉淀和结晶紧密相关。在 Kairei 和 Edmond 热液区, 硫化物中的 Os 同位素组成与现代海水的接近, 其可能是海水和热液流体混合的结果(Wu *et al.*, 2014a)。以上工作, 证实海底硫化物中 Re 和 Os 含量及其同位素组成的研究是理解热液系统演化的一个重要工具, 可有效确定这两种金属元素的来源并重建其沉淀的物理化学条件。

在热液硫化物的 REE 组成方面, 指出为了重建成矿流体的演化过程, 确定海底硫化物沉淀的物理化学条件, 需要更好地了解硫化物中 REE 的来源、影响硫化物中 REE 含量的因素以及从热液流体到硫化物的 REE 通量。为此, 通过研究硫化物中的 REE 组成, 表明全球海底热液系统中的块状硫化物, 其稀土元素配分模式与喷口流体中的相似, 呈现轻稀土元素富集的特征, 且硫化物中不同的稀土元素含量、铕(Eu)异常以及轻稀土元素和重稀土元素之间的分馏与流体的稀土元素性质和块状硫化物的矿物化学组成有关, 估计现代海底硫化物堆积体中含有约 280 t 的稀土元素。此外, 流体中未被硫化物捕获的大量稀土元素, 其可能会被流体和热液柱搬运, 并结合在硫酸盐矿物和含金属沉积物中(Zeng *et al.*, 2015a)。

在海底硫化物等热液产物中流体包裹体的稀有

气体同位素组成方面, 已知分析硫化物中惰性气体的同位素组成对于了解成矿流体的成因有着重要的意义, 既能确定惰性气体的来源, 又能揭示流体-岩石相互作用和地幔脱气的程度。为此, 研究了 EPR、MAR、CIR、SWIR 和北斐济弧后盆地不同热液区 27 个硫化物、3 个硫酸盐和 2 个蛋白石矿物集合体样品中的惰性气体浓度和同位素组成, 证实低温热液流体在冷却过程中失去了地幔氦(He), 且高(>7 Ra)、中(1—7 Ra)以及低(≈ 1 Ra) $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值样品中的 He 分别主要来源于岩浆脱气的地幔或洋岛玄武岩(Ocean Island Basalt, OIB)地幔、成矿过程中热液与海水的混合以及周围的海水。依据 He/热的比值计算, 全球高温热液喷口的 He 和热通量约为每年 0.05×10^4 — 6×10^4 kg 和 0.1×10^{12} — 12×10^{12} W, 这意味着大约 0.3% 的海洋热量由海底高温热液活动提供(Zeng *et al.*, 2015b)。此外, 在西南印度洋脊 49°—50°E, 其海底硫化物中的 He 和 Ar 分别来自于地幔和海水, 且部分的 He 通过 Marion 和 Crozet 热点的活动可能来自下地幔(Wang *et al.*, 2014)。随后, 为了解中印度洋脊 Edmond 热液区成矿流体的来源和性质, 研究了热液产物的流体包裹体及其 He-Ar 同位素组成, 指出硫化物样品中含有稀有气体 He、Ne、Kr 和 Xe, 其丰度介于空气饱和水(air saturated water, ASW)和洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalt, MORB)之间, 证实其 He 来源于 MORB 与海水的混合物, 且硫化物中的 Ar 则主要来源于海水(Wang *et al.*, 2017c)。

在热液硫化物的硫(S)、铅(Pb)同位素组成方面, 研究了 EPR、MAR、CIR、SWIR 和北斐济海盆不同热液区中硫化物矿物的 S、Pb 同位素组成, 指出硫化物样品的 S 同位素组成变化范围较大($\delta^{34}\text{S}$ 0.0 ~ 9.6‰), 其 S 主要来源于火成岩, 在海水与热液流体混合过程中, 硫化物中所含海水来源 S 的比例较小(<36%)。与硫化物中 S 的混合来源不同, 硫化物的大多数 Pb 同位素组成具有与玄武岩一致的 Pb 同位素组成, 表明其 Pb 主要来自玄武岩。此外, 硫化物的 S、Pb 同位素组成受形成海底块状硫化物堆积体的流体过程控制, 且 S 和 Pb 同位素组成的变化与 S 和 Pb 的来源、流体-岩石相互作用和流体-海水混合有关(Zeng *et al.*, 2015c)。此外, 在大西洋洋中脊 15.2°S 的热液区, 也发现硫化物的 Pb 同位素组成与玄武岩样品的相似, 表明硫化物中的 Pb 来源于围岩-玄武岩, 且热液流体在块状硫化物沉淀期间与海水发生了混合(Wang *et al.*, 2018a)。随后, 为了认识硫化物在微观尺度上的原位

S 同位素组成变化, 使用灵敏的高质量分辨率离子微探针(sensitive high resolution ion microprobe, SHRIMP SI)分析了东太平洋海隆 1°—2°S 热液区的硫化物烟囱体, 证实烟囱体生长过程中存在海水来源 S 与岩浆-热液流体来源 S 的混合(Meng *et al.*, 2018)。此外, 研究了龟山岛热液区自然硫中的 S 同位素、微量元素和亲硫元素(Se、Te、As、Sb、Hg)组成, 指出海水硫酸盐中的 S 对自然硫的贡献很小(Yu *et al.*, 2019)。

在硫化物的铁(Fe)和锌(Zn)同位素组成方面。一方面, 先后研究了 EPR 和南大西洋洋中脊(South Mid-Atlantic Ridge, SMAR)中热液硫化物的 Fe 同位素组成, 指出硫化物沉淀和后期氧化风化导致明显的 Fe 同位素分馏, 明确了 SMAR 硫化物中的 Fe 主要来自玄武岩, 且在 EPR 由于硫化物的快速沉淀使铁同位素产生动力分馏, 导致沉淀的硫化物富集轻的 Fe 同位素, 而重 Fe 同位素则富集在黄铁矿的氧化产物中(Li *et al.*, 2018c)。研究了黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿中 Fe 同位素组成的变化及其可能的控制因素, 指出洋中脊热液体系中 Fe 同位素组成的范围很大, 具有 ^{54}Fe 相对富集的特征, 且喷口流体的温度、性质和矿物的沉淀过程显著影响着硫化物的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值。证实黄铜矿优先富集 ^{56}Fe , 而闪锌矿和黄铁矿则富集 ^{54}Fe (Li *et al.*, 2017a)。此外, 报道了南大西洋洋中脊德音-1 热液区烟囱体壁的横向上硫化物的 Fe 和 S 同位素组成, 发现烟囱体壁内黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 从外到内增加, 其可能与黄铁矿和流体之间 S 和 Fe 同位素分馏的增强有关, 且烟囱体壁内 Fe 与 S 同位素的规律性和耦合变化有效地制约了硫化物的形成过程(Wang *et al.*, 2020a), 这表明海底热液烟囱体不仅是一种重要的金属资源, 且对海洋化学平衡具有重要影响。

另一方面, 分析了 SMAR(13°—15°S)热液区中不同类型硫化物及其氧化产物的 Zn 同位素组成, 发现 EPR(9°N、21°N)的热液区和 MAR 的 TAG(trans-Atlantic geotraverse)热液区中硫化物样品的 Zn 同位素组成一般都在其他洋中脊热液区硫化物的 Zn 同位素组成变化范围内, 且与其他热液区硫化物的 Zn 同位素组成相比, 南大西洋洋中脊中的硫化物存在 Zn 同位素相对偏轻(平均 $\delta^{66}\text{Zn}=+0.39\%$)的特点。证实富 Zn 硫化物对轻 Zn 同位素的明显富集, 则是由于其在沉淀过程中 Zn 同位素发生动力分馏所致。此外, 硫化物及其氧化产物的 Zn 同位素组成(平均 $\delta^{66}\text{Zn}=+0.12\%$)明显轻于海水的 Zn 同位素组成($\delta^{66}\text{Zn}=+0.5\%$), 其作为轻 Zn 同位素的汇, 进一步制

约了现代海洋中 Zn 同位素的循环(Li *et al.*, 2018d), 这表明在海底热液活动中发生了显著的 Zn 同位素分馏。因此, 探讨热液和氧化过程对 Zn 同位素组成的影响, 将有助于更好地了解热液循环及洋中脊硫化物的沉淀过程。

2.2 海底热液流体研究

在海底热液流体方面, 围绕其 CO_2 浓度的测定和物理性质、化学组成以及有机质的分析开展了研究。包括, 针对传统的化学分析方法不能直接测定高温热液流体中溶解 CO_2 的浓度, 研究建立了一种适合于热液环境的原位拉曼定量测定流体中溶解 CO_2 的方法(Li *et al.*, 2018b)。随后, 在冲绳海槽的 Yokosuka 热液区观察到温度高达 383.3 °C 的微光水, 其存在过热的蒸汽相, 属于低密度的热液流体, 且该低密度热液流体的喷发对于海洋环境和资源分布的影响值得重视(Li *et al.*, 2020b)。此外, 利用原位拉曼光谱技术, 对冲绳海槽南部热液喷口中出现的超临界 CO_2 进行了识别, 发现超临界 CO_2 中的 N_2 峰明显大于海水和喷口流体中的 N_2 峰, 表明超临界 CO_2 能富集周围环境中的 N_2 , 且指出在地球早期, 具高 N_2 的超临界 CO_2 可能是水-气界面附近主要的 CO_2 相, 这促进了对生命起源至关重要的氨基酸和其他有机物质的合成、预富集和保存(Zhang *et al.*, 2020c)。

研究了海底热液流体的物理化学特征。包括, 在超慢速扩张西南印度洋脊 49.6°E 的龙旗热液区, 于 2015 年 1 月载人潜器(human occupied vehicle, HOV)“蛟龙”号下潜过程中, 采集到热液流体样品, 发现了该区具有单一的流体来源, 存在经过相分离(约 28—30.2 MPa 和 400.6—408.3 °C)产生的卤水相和蒸汽相流体, 且其端元流体的化学组成与已知的全球海底热液流体的化学组成变化范围相当或落在其变化范围内, 证实了洋中脊扩张速率不是直接控制热液流体化学组成的关键因素, 而热液区的基底岩石组成、水-岩相互作用和相分离是控制喷口流体化学组成的主要因素(Ji *et al.*, 2017)。

开展了台湾东北部龟山岛热液区中流体的有机质组成分析。在 2010 年 8 月的两次航行中, 从该热液区的白色喷口和黄色喷口采集了水样, 发现在白色喷口及其下方 1 m 处, 其流体在波长 300 nm 处的吸收系数($2.52\pm 0.88 \text{ m}^{-1}$), 远高于背景值($0.34\pm 0.12 \text{ m}^{-1}$), 这表明海底热液区的白色喷口流体是海水发色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)以及类腐殖酸和类酪氨酸溶解有机物的来源(Yang *et*

al, 2012)。进一步, 测定了冲绳海槽西南端龟山岛热液区中海水、安山岩、喷口流体和热液柱样品的硼浓度和硼同位素组成, 发现喷口流体和热液柱中的硼主要来自海水, 很少来自安山岩, 这说明龟山岛热液区海底下流体与安山岩的相互作用持续时间较短, 热液柱的硼浓度和硼同位素组成可以用来描述控制海水环境中热液柱化学组成的扩散过程, 且从黄色喷口到海洋的硼通量在 1.17×10^5 — 1.32×10^5 mol/a 之间, 而从白色喷口到海洋的硼通量则在 6.69×10^4 — 7.17×10^4 mol/a 之间(Zeng *et al*, 2013)。同时, 研究指出, 在龟山岛热液区, 黄泉喷口流体的总 REE 浓度与白泉喷口流体的相似, 显著高于周围海水的, 且喷口流体的稀土元素组成受水-岩相互作用、流体极低的 pH 值(2.81 和 2.29)、流体沸腾和自然硫沉淀的影响(Wang *et al*, 2013)。

2.3 热液柱研究

分析了热液柱的物理性质和化学组成特征, 进行了热液柱的计算模拟, 发展了用于海底热液柱探测数据的校正方法, 并研究了海底热液柱上升过程中颗粒物的运移和沉淀类型。包括, 基于拉格朗日粒子随机游走算法(Lagrangian particle random walk algorithm), 提出了一种模拟深海热液柱的计算模型。该模型展示了热液柱的三维非浮力和浮力特征, 对以往用于示踪热液柱以及定位其源头的技术方法提出了重大挑战, 为评估和优化用于探测热液柱的自主水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV), 提供了一个有力的工具(Tian *et al*, 2013)。随后, 将便携式微型自动热液柱记录仪(portable miniature autonomous plume recorders, MAPR)安装到深海拖体上, 用于寻找热液柱和喷口。分析了影响 MAPR 数据质量的因素, 提出了一套可用于 MAPR 的数据校正方法, 包括仪器的位置校正、降噪处理、系统误差消除和海水背景降低。在此基础上, 将该校正方法应用于“大洋一号”DY115-21 航次在加拉帕戈斯微板块宝石山热液区的调查, 为了解该区热液活动的分布、证实新热液喷口的存在提供了工作支撑(Chen *et al*, 2014)。

进一步, 研究证实了热液柱的浊度、流速、pH 值、溶解铁和溶解锰组成可以用于了解海底热液系统的空间分布及其流体来源, 且靠近喷口流体源的热液柱(被解释为具有相对年轻的年龄)随着时间的推移, 发生化学扩散, 并且其化学组成的浓度变得更类似于远离其喷口流体源的热液柱(Zeng *et al*, 2020a), 这

为了解海底热液流体的物理和化学特征, 进而揭示热液系统的围岩、海底面以下的流体反应条件和海水演变过程提供了研究支撑。同时, 研究了海底热液柱上升过程中颗粒物的运移和沉淀类型, 指出热液柱中颗粒物的归宿在很大程度上取决于沉降速度, 其可以悬浮、近喷口沉积或远距离输送, 且卷吸流和热液柱干周围的旋涡是喷口附近含金属沉积物富集的主要原因, 进一步提出了沉积位置随沉降速度变化的预测公式(Lou *et al*, 2020)。

在 2007 年, 重访了东南印度洋脊的 K 段, 并在 CTD 作业站位观测到了一个水柱浊度异常。该站位位于 1996 年美国科学家探测到的热液柱水体异常上, 计算其热液柱的发生率约为 0.28, 大于预测的 65 mm/a 扩张速率洋脊上热液柱的发生率 0.25(Wang *et al*, 2011)。随后, 中国“大洋一号”DY115-19 航次在西南印度洋脊岩浆活动强烈的扩张洋脊段处($37^{\circ}47'S$, $49^{\circ}39'E$), 发现了第一个海底热液活动区。在此基础上, 发现热液柱中的颗粒物主要来源于喷口流体, 也包括少量的再悬浮沉积物或背景颗粒, 且由于热液柱中有机络合物和纳米颗粒的存在, 其溶解相中的高铁浓度可能会持续存在(Wang *et al*, 2012)。此外, 研究了西南印度洋脊热液喷口区 7 个站位的水体悬浮颗粒样品, 发现了 29 种不同形貌的闪锌矿颗粒(Sun *et al*, 2014), 证实该热液柱的颗粒物具有不寻常低的 ^{234}Th , 进而开展了热液柱中颗粒物动力学研究, 揭示了热液柱中不同的颗粒物动力学特征, 并为了了解全球大洋中碳和微量元素循环提供了研究支撑(Yang *et al*, 2016)。随后, 明确了西南印度洋脊龙旗热液区中同一热液柱中 Fe 的物理分配和化学组成, 揭示热液柱中胶体 Fe 和可溶性 Fe 的组成不同, 且可溶性配体稳定的热液 Fe 是胶体配体的 2 倍以上(Wang *et al*, 2019a)。

不仅如此, 在 2018 年, 中国学者利用粒子图像测速技术对来自快速扩张的东太平洋海隆的 V 喷口和 Biotranssect 喷口以及中快速扩张的胡安德富卡洋脊 Endeavour 段的 Grotto 丘和慢速扩张北大西洋洋脊 TAG 区热液柱的数字视频图像进行了定量分析, 研究了洋中脊热液柱垂直通量的短周期变化, 论证了热液柱通量的振荡周期和振幅随热液柱垂直通量的减小而增大, 且观测到的热液柱振荡周期具相对较窄的带宽(0.5—5 s)(Zhang *et al*, 2019b)。同时, 研究了冲绳海槽中南部 25 个站位热液柱样品的主要成分组成, 明确黑潮的输入影响了冲绳海槽热液柱的物

理化学性质,且从冲绳海槽南部至中部,黑潮对热液柱的影响减小,并给出了冲绳海槽的热液 K、Ca、Mn 和 B 通量以及热通量,指出冲绳海槽的热液柱提供了约 0.000 6% 的海洋热量,这对于更好地理解生物地球化学循环和海底环境中元素的大规模分布至关重要(Zeng *et al.*, 2018b)。

同时,在马努斯弧后盆地东部的热液柱中,发现 As 和 Sb 与 Mn 呈显著正相关,As 和 Sb 在热液柱中的分布不受颗粒吸附和生物地球化学循环的控制,表明 As 和 Sb 与 Mn 一样,可以用来探测和描述海水环境中热液柱的特征(Zeng *et al.*, 2018a)。

此外,在龟山岛热液区的白色(24.83°N, 121.96°E)和黄色(24.83°N, 121.96°E)喷口附近,研究了热液柱四个深度的温度、pH 和 Eh,证实潮汐是影响环境的主要因素,且由于退潮,热液柱主要由北向南扩散。从温度扩散场上观察到了热液柱的旋涡,指出 Eh 负异常是寻找热液柱和确定流体喷口的较好指标(Han *et al.*, 2014)。随后,研究了马里亚纳弧后扩张中心高温、低温喷口和扩散喷溢口上方热液柱中 Fe 的形态和 Fe 结合配体的分布,指出 Fe 结合配体可能来源于邻近的扩散喷发流体,也可能由热液柱中的微生物产生(Wang *et al.*, 2021)。同时,首次研究了位于台湾东南部潮间带中绿岛热液区的热液系统。与海水相比,其喷口流体的 Mg 含量低,Cl 和 H⁺含量中等富集,显示该区的喷口流体来自低程度亚临界相分离形成的卤水相,而喷泉流体则来自低程度亚临界相分离形成的汽相,且相分离的温度和压力分别约为 150 °C 和 7 bar,粗略计算其水和岩石比约为 2 (Chen *et al.*, 2020)。不仅如此,绿岛热液系统略受半日潮、潮汐负荷和潮流的影响,且潮汐与热液系统响应之间的时间延迟约为 3 h。2014 年 9 月 21 日的台风“凤凰”导致淡水(约 16%)侵入该区的喷口流体,且台风发生后,流体的端元组成发生了相应的变化,反映其反应区冷却。台风经过后,热液系统开始恢复,表现为喷泉中流体的端元组成比例增加,淡水贡献减少,且喷泉流体的端元通量估计为 460—560 L/h (Chen *et al.*, 2020)。

2.4 海底热液活动的成矿作用研究

海底硫化物堆积体具有巨大的潜在经济价值和良好的开发前景。在南大西洋洋中脊和卡德诺断裂带之间的内角交叉点,进行了海底热液活动的成矿作用研究,明确其热液堆积体以块状黄铁矿-白铁矿角砾岩为特征,含富硅脉石矿物,且稀土元素配分模式显示正 Eu 异常和负 Ce 异常共存,表明该区的硫化物

是海水和喷口流体混合后扩散排放的产物(Li *et al.*, 2014)。随后,通过分析在南大西洋洋中脊周瑜-1 和周瑜-2 热液区多年(2009、2011、2013 年)收集的热液柱的浊度、氧化还原电位和温度异常数据,进行了活动喷口区及其硫化物堆积体的定位(Tao *et al.*, 2017)。在西南印度洋脊的玉皇-1 热液区,通过硫化物的 Zn 同位素组成和元素比值研究,分析了玉皇-1 热液区的 Zn 同位素分馏、成矿条件和成矿过程,指出了该热液区存在两期的硫化物成矿作用(Liao *et al.*, 2019)。

此外,现代化能自养微生物的成矿作用被认为是地圈和生物圈之间的纽带,是生物科学和地质学的重要补充。研究现代海底热液系统中的生物成矿作用,有助于揭示地球早期历史、生命演化、深部生物圈和外太空微生物的奥秘。随着微电子技术和分子生物学技术的引入,热液生物成矿作用已成为近十年来地质生物学的热点。在可预见的未来,研究热液生物成矿作用将继续促进地球科学和生物科学的发展,丰富我们对地球历史、生命演化乃至天体生物学的认识(Zhang *et al.*, 2019a)。

2.5 构建海底热液地质学

构建了海底热液地质学的框架,包括厘定了海底热液活动研究的基本概念,划分了海底热液产物的类型,将热液活动及其产物的分布划分为域、带、亚带、区和点五级,建立了硫化物“两阶段六过程”调查模式,在冲绳海槽,发现新热液活动区-唐印热液区,观测到巨型海底硫化物丘状体,为我国海底硫化物资源调查、热液成矿作用研究及建立深海热液活动及硫化物资源调查研究基地等工作提供了支撑(曾志刚, 2011)。

2.6 研究海底热液活动与生物活动的关系

对位于超慢速扩张西南印度洋脊上热液烟囱体的宏基因组进行了热测序,以阐明相关的微生物硫循环。在硫氧化自养细菌中发现了几种碳代谢途径,特别是开尔文循环(Calvin-Benson-Bassham, CBB)的途径和固定 CO₂ 的还原性三羧酸循环,明确了短链烷烃在硫循环中起着重要作用。阐明了微生物硫循环在维持超慢速扩张洋中脊热液烟囱体中整个微生物群落的重要作用,指出它具有不同于其他类型热液区烟囱体中微生物群落的特征(Cao *et al.*, 2014),证实了硫是维持热液喷口微生物群落的重要元素,且硫氧化在热液区化能合成中具有重要的作用,对硫酸盐还原产生了影响。随后,研究了西南印度洋脊热液柱中的微生物群落结构,指出热液柱中的微生物群

落来源于周围的海水,而不是起源于热液喷口(Li *et al.*, 2016)。不仅如此,还对来自 Guaymas 海盆的烟囱体样品进行了整合的宏基因组和宏转录组学分析,以实现每个硫代谢途径及其宿主微生物的全面研究,并构建了发生在该区的微生物硫循环,进而证实了在烟囱体壁的分层硫氧化和硫酸盐还原。此外,Guaymas 海盆的硫代谢与碳循环,特别是与油气降解过程密切相关。这一结果不仅支持了热液生态系统内部硫循环强度高、净硫收支低的观点(He *et al.*, 2015),也表明烟囱体中无机硫化物是丰富的,并通过化学合成途径进行了积极的转化,且鉴于微生物硫循环的复杂性,未来需对热液喷口中的硫收支进行细致的刻画及认识。进一步研究了现代海底热液系统的物质循环和生物矿化,指出铁锰硅循环和无机流体与微生物的相互作用可能保留甚至遵循了古海洋的原始运行模式,且整个海洋演化过程中的热液活动对于研究古物质循环和古环境重建均具有重要意义(Sun *et al.*, 2016)。同时,从东太平洋海隆热液区的硫化物中分离出了一株厌氧嗜热铁还原菌(*Caloranaerobacter ferrireducens* sp.nov.)(Zeng *et al.*, 2015c)。随后,研究了南大西洋洋中脊深海热液喷口中真菌的分布和多样性,发现其真菌群落以子囊菌纲和担子菌纲为主,且烟囱体样品中的真菌群落结构与硫化物样品中的真菌群落结构不同,这为深入了解深海热液喷口生态系统中真菌的多样性和丰富度提供了新的见解,增加了对深海环境中真菌多样性的认识和理解(Xu *et al.*, 2017)。

在东北太平洋胡安德富卡洋脊的 Main Endeavor 热液区,中国学者不仅研究了硫化物和硫酸盐烟囱体的结构、矿物和化学组成,还分析了在烟囱体表面积聚的二次蚀变产物的超微结构,发现其与铁氧化细菌(FeOB)相关的超微结构丰富,具有指示性的形态学特征,且铁氧化物种可能促进硫化物烟囱体的氧化风化,并与铁氧化、固氮、氨氧化和反硝化等一系列地球化学过程密切相关。最后,通过对热液烟囱体内微生物群落的研究,可以推断出从硫酸盐烟囱体形成早期到成熟的硫化物结构,再到最终蚀变的硫化物烟囱体的微生物群落演替规律,微生物参与氧化风化过程和微生物演替发生在高温热液活动停止后的硫化物烟囱体中(Li *et al.*, 2017c),这使得我们对热液硫化物烟囱体在海底经历的氧化风化过程以及风化过程中相关的微生物群落结构及其演替有了更深入的认识。此外,在进行热液喷口区分离株(黄绿

假交替单胞菌的亮氨酸氨基肽酶)的克隆与鉴定过程中,证实乙二醇四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、蛋白酶抑制剂和 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 等金属离子对重组表达胞外亮氨酸氨基肽酶(recombinant expressed extracellular enzyme leucine aminopeptidases, rPtLAP)有抑制作用,且 rPtLAP 对热液喷口中富集的 Mn^{2+} 有较强的耐受性。此外,胞外酶(extracellular enzyme leucine aminopeptidases, PtLAP)执行有机物的降解,有助于微生物在深海环境中的适应性生存,并可能在海洋生物地球化学循环中发挥重要作用(Zhang *et al.*, 2018c)。同时,从东太平洋海隆硫化物中分离到一株新的嗜压、嗜热、厌氧、发酵的梭状芽孢杆菌属铁还原细菌,命名为发酵厌氧杆菌 DY22613T。研究了它的细胞生长、发酵代谢产物、生物矿化以及异化铁还原,明确发酵厌氧杆菌 DY22613T 在深海热液沉积物中的潜在作用是将铁还原和矿物转化与生物分子的发酵耦合起来,且这种细菌可能参与了深海热液区复杂的生物地球化学铁循环,并有助于深入了解发酵厌氧杆菌 DY22613T 中异化铁(III)还原的机制,及其在深海热液区铁的生物地球化学循环中的作用(Li *et al.*, 2019),这表明异化铁还原微生物在铁的生物地球化学循环中起着重要作用,且影响着铁矿物的形成和转化。随后,研究了微生物群落在热液柱扩散路径上的分布和演变,并在西南印度洋脊的龙旗热液区,研究发现在喷口附近形成的初始热液柱,微生物种群以丰富多样的喷口相关群落为特征,包括(超)嗜热菌,以及一些化能无机自养生物。相比之下,在上升的浮力热液柱和邻近海水中,大多数与喷口相关的微生物类群仍然存在,但对群落组成的贡献很小(Li *et al.*, 2020a)。同时,证实了深海热液喷口处的扩散流体产生快速、剧烈的物理化学梯度,其与喷口动物群的分布密切相关(Zhu *et al.*, 2020b)。此外,在台湾东北部龟山岛热液区的酸性喷口流体附近生活着乌龟怪方蟹(*Xenograpsus testudinatus*),发现其对金属元素的积累是通过呼吸途径而不是通过食物的吸收,且金属元素在其组织中的分布模式与在胰腺腺和肌肉中的相似,但在鳃和外骨骼中却有很大的不同,这可能是由于金属元素在不同组织中的利用途径不同所致(Peng *et al.*, 2011)。随后,采用 ^{13}C 标记法测定了龟山岛热液区热液柱中光、暗溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)的吸收速率,指出随着热液柱扩散和混合的继续,化能自养活动开始上升,并在 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 处于低到

中等含量的热液柱中达到峰值,且在热液柱的边缘,化能自养能力下降到背景水平,以浮游植物的光合作用为主(Lin *et al.*, 2021)。同时,在东太平洋海隆,研究发现硫化物矿物被广泛淋滤,矿物表面有特征的微生物溶坑;加之,原位观测到与溶坑密切相关的类硫杆菌及其代谢产物,证实了海底硫化物堆积体中存在着微生物对固体矿物的淋滤作用(Liu *et al.*, 2020a)。进一步,指出在海底热液产物堆积体中所发现的不同数量的铁和硫氧化微生物,其在海底硫化物堆积体的风化作用中起着重要作用。同时,将基因组解析的宏基因组学应用于东太平洋海隆 9°—10°N 热液喷口区的硫化物烟囱体,发现在流体正在活动的烟囱体(L-vent)中,硫化物和/或氢氧化 Campylobacteria 和 Aquificae 被确定为主要的群落成员和初级生产者,其通过还原性三羧酸(tricarboxylic acid cycle, rTCA)循环固定碳。相比之下,流体停止活动的烟囱体(M-vent),其微生物群主要由各种细菌门的异养菌组成,包括 Delta-/Beta-/Alphaproteobacteria 和 Bacteroidetes,且 Gammaproteobacteria 被确定为主要的初级生产者,其通过 CBB 利用硫化物的氧化和/或铁的氧化以及硝酸盐的还原来固定碳(Hou *et al.*, 2020)。

3 发展了用于海底热液活动及其硫化物调查研究的新技术

中国学者先后发展了用于海底热液活动及其硫化物等热液产物调查研究的技术方法。包括,设计了一种新型的、可用于深海热液流体取样器的钛取样阀,其能在水深 6 000 m、温度达 400 °C 的喷口流体处作业。在 2008 年的 KNOX18RR 航次,该新型取样阀已被应用于气密取样器上,且在大西洋洋中脊采集了深度 744—3 622 m、温度 94—370 °C 的喷口流体,证实了该新型取样阀对深海热液流体的采集是有效的(Wu *et al.*, 2011)。随后,研制了海底热液喷口温度场测量的声学方法,提出了两种声学信号传播路径的抛物线插值和弯曲补偿技术,提高了运行时间估计的精度。同时,通过对不同平均值下温度场计算结果的比较,给出了最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差,可以应用于海底热液喷口周围温度场的准确测量(Cai *et al.*, 2012)。进一步针对海底硫化物堆积体形成的地质复杂性和钻孔取样的有限性,研究提出了一种稳健最小二乘支持向量机(robust weighted least square support vector machine, LS-SVM)回归模型来解决西南太平洋马努斯海盆 Solwara 1 海底硫化

物堆积体的矿石品位估算问题,并提出一种加权 K 近邻(weighted K-neared neighbor, WKNN)算法对缺失值进行插值,证实了稳健加权(robust weighted least square support vector machine, LS-SVM)算法性能优于其他方法,且具有很强的预测能力和泛化能力(Zhang *et al.*, 2013)。

随后,研制了一种新型的气密取样器,其采用电控取样阀进行流体采集,并在取样时测量和显示热液流体的温度,既可在手动模式下工作,通过外部信号控制,也能在自动模式下根据温度采集流体样品,可以很容易地放置在潜水器上或由潜水员携带,用于收集深海和浅水热液喷口的流体样品,且已通过浅水热液喷口现场的初步试验掌握了该取样器的性能(Wu *et al.*, 2014b)。随后,研究提出了一种同时测定水样中 H₂ 和 CH₄ 浓度的方法。该方法首先将水样中的 H₂ 和 CH₄ 提取到注射器的顶空中,然后注入气相色谱系统。H₂ 和 CH₄ 均被脉冲放电氦离子化检测器检测到。通过在适当的时间窗口将 O₂ 和 N₂ 从载气流中切换出来,可以实现海水中 CH₄ 与 O₂ 和 N₂ 的分离,且使用该方法已成功测定了西南印度洋脊热液柱水样中 H₂ 和 CH₄ 的浓度(Wang *et al.*, 2015)。

为了解洋中脊硫化物堆积体的磁性及其磁性结构特征,研究建立了镁铁质和超镁铁质围岩中硫化物堆积体的三维正演模型来模拟近底磁场,指出镁铁质围岩中硫化物堆积体上方存在低幅磁异常,超镁铁质围岩中硫化物堆积体上方存在高幅磁异常,可用于识别和分类硫化物堆积体的围岩以及识别磁异常的边缘。基于此,提出了空间微分矢量强度法可作为确定硫化物堆积体边界的有效方法(Wu *et al.*, 2016a)。随后,提出了一种新的深海硫化物开采设备,分析了该设备在开采过程中的工作机制,并应用仿真技术验证了该设备的适用性(Hu *et al.*, 2016)。同时,研制了超高居里温度(>800 °C)低烧结温度 Bi_{2(1-x)}La_{2x}WO₆ 压电材料,可用于海底热液喷口探测(Liao *et al.*, 2016)。

不仅如此,由于长期原位监测是海底科学研究的关键之一,且在海底应用传感器的挑战之一是传感器的寿命。为此,中国学者研制了一种热电帽,它通过导热管收集流体的热能,并利用热电发电机将热能转化为电能。然后,在台湾东北部龟山岛热液区的浅海热液喷口对该热电帽进行了现场测试,利用热液流体与海水之间的热梯度,热电帽在现场试验

中获得了 0.2—0.5 W 的持续功率, 成功地为 16 个热电偶供电, 并记录了整个现场测试期间热液流体的温度, 这表明, 热液流体的热能可以作为海洋的可再生能源(Xie *et al.*, 2016)。随后, 基于先前研制成功的深海沉积物孔隙水拉曼探针, 开发了一种新的深海合成拉曼插入探针(raman insertion probe, RiP), 可直接插入从热液喷口冒出的高温(>400 °C)流体中工作。通过更换探针的各种尖端和光学元件, 即可原位分析热液喷口流体、冷泉流体和沉积物孔隙水剖面(0—60 cm)的化学组成。在冲绳海槽和马努斯海盆的热液区中, 已使用新型的 RiP 进行了探测, 获得了高温(290 °C)热液喷口的 CO₂、CH₄、H₂S、HS⁻、SO₄²⁻ 和 S₈ 的拉曼光谱峰, 证实 RiP 系统可为研究热液喷口流体的地球化学特征提供一个非常有用的工具, 且海底热液喷口流体及其伴生的生物群落在硫和碳循环中起着非常重要的作用(Zhang *et al.*, 2017a)。

发展了海底热液柱探测技术。利用时间分辨粒子图像测速仪(time-resolved particle image velocimetry, PIV)测量了长时间线性分层海水中实验室产生的湍流浮力水柱的瞬时二维速度矢量场。从 PIV 实测的时间序列流动数据中, 定量分析了水柱平均流动和湍流的特征(Zhang *et al.*, 2017b)。随后, 提出了一种模拟海底热液喷发的新颖可视化实验装置, 其主要由丙烯酸压力容器和热液流体注射器泵组成, 可 360°地观察模拟的流体喷发和热液柱, 且通过理论计算和有限元分析, 论证了丙烯酸压力容器材料选择和结构设计的合理性。目前, 已在 300 °C 和 12 MPa 的高温高压条件下对该实验装置进行了试验, 且利用该装置成功地进行了热液流体喷发实验, 获得了清晰的热液柱图像(Wu *et al.*, 2018)。

发展了海底热液硫化物开发利用技术。包括, 对海底硫化物样品进行了单轴抗压强度(uniaxial compressive strength, UCS)和三轴抗压强度(triaxial compressive strength, TCS)试验, 获得其关键力学性能数据资料, 包括黏聚力、内摩擦角、抗压强度和抗剪强度, 弹性模量和泊松比。然后, 利用 PFC3D (particle flow code in three dimensions)程序, 进行了单轴和三轴数值模拟。在此过程中, 通过校准过程改变模拟中的微观特性, 直到它们与实验室测试中测量的硫化物样品的宏观特性相匹配。最后, 利用该微观特性对单截齿和相邻两截齿的切削过程进行仿真, 并对短截齿破碎过程中的切削力进行了监测和数据采集, 这对短切采矿机的开采模拟和截齿最大受力

的预测具有一定的指导意义(Dai *et al.*, 2019)。同时, 由于海底硫化物的年龄是估算热液堆积体规模的重要指标, 为此, 研制了海底硫化物样品中铀、钍同位素的提纯和分离方法, 即将小于 0.2 g 的样品, 称重、溶解、加入 ²²⁹Th-²³³U-²³⁶U 双倍加标溶液, 铁共沉淀, 并在阴离子交换树脂萃取柱上分离。采用该技术, 分离出的铀和钍组分可以满足多接收器电感耦合等离子体质谱(multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry, MC-ICPMS)的测量要求, 为了解海底硫化物的年龄提供了测试分析方法支撑(Wang *et al.*, 2019b)。

为了对潜在的热液活动区实现低成本、针对性强、范围广的准确预测, 提出了一种基于小波神经网络的海底热液活动区预测方法。首先, 将来自于 InterRidge 喷口数据库的热液位置信息与 Argo 数据库中的热液温度信息集成起来, 构建了一个数据集。然后, 将小波分析与人工神经网络相结合, 建立了一种小波神经网络优化算法。最后, 将温度和盐度数据输入小波神经网络, 对海底热液活动区进行预测。采用七次交叉验证对模型进行了性能评价, 预测准确率达到 90.43%。实验结果表明, 盐度与热液活动区的存在无关, 而与周围水温有很强的相关性。因此, 利用以海水温度为输入的小波神经网络模型预测海底热液活动区是有效可行的。虽然人工神经网络不能完全替代传统的热液活动调查技术, 但它无疑可以提供针对性很强、有价值的参考(Liu *et al.*, 2020b)。同时, 研制了可采集多个深海气密流体样品的新型系列采样器, 其由采样阀和六个采样气缸组成, 可放置在载人潜器(human occupied vehicle, HOV)或遥控操作机器人(remote operated vehicle, ROV)上, 作业水深达 7000 m, 实现每个气缸可采集约 160 mL 的气密性流体样品, 同时, 可将样品保持在接近原位的压力状态下, 且该采样器已在胡安德富卡洋脊和印度洋脊的热液喷口处, 成功采集到了流体样品(Wang *et al.*, 2020c)。不仅如此, 针对海底块状硫化物(seafloor massive sulfide, SMS)堆积体越来越受到人们的关注, 已成为当前海底矿产资源勘查的重点之一, 且一个关键的挑战是如何圈定 SMS 堆积体, 并估计其数量和质量, 以便进行资源评价及未来开采。为此, 研制了一种固定的海洋可控源电磁法(controlled-source electromagnetic method, CSEM)进行 SMS 勘探, 并通过针对海底浅部导电目标的海洋 CSEM 测量数值模拟, 研究了沉积地层电各向异性的影响(Peng *et al.*, 2020)。

4 未来展望及发展趋势

在过去的 10 年, 通过开发新的声学浊度传感器、热液柱探测和原位光谱测量等海底热液活动调查方法和探测技术, 调查了海底热液活动的地质过程及其对资源和环境的影响, 从而推动了对海底硫化物和含金属沉积物资源潜力的认识。包括建立了一个“两阶段、六过程”的海底热液活动调查研究模型, 发现唐印等一批新的海底热液活动区, 分析了热液产物, 特别是硫化物的物质来源及其成矿的控制因素, 揭示了硫化物的形成过程, 建立了计算硫化物氢/热比值以及同位素组成离散度和变化率的新方法, 为确定硫化物等热液产物的成因提供了研究支撑。同时, 拓展了将热液区螺、蟹等生物作为地质样品, 揭示了其记录的热液活动信息, 实现了热液活动如何影响海底地质环境的多维解释, 为保护海底热液生态环境提供了研究支撑。不仅如此, 提出了海底热液活动、冷泉及天然气水合物的同源异汇假说, 推动了海底热液地质学的进步(曾志刚, 2011, 2020; Zeng *et al*, 2020b)。

在此基础上, 未来, 将聚焦海底热液活动的深部过程及其资源环境效应关键问题, 发展海底热液活动探测、原位观测和长期监测技术, 结合人工智能和大数据技术的运用, 拓展北极和南极及其邻域的海底热液活动调查研究, 以海底热液区的结构与物质组成为重点, 开展系统的调查研究工作, 绘制海底热液区深部地质图, 并围绕热液烟囱体、热液丘状体、热液柱、含金属沉积物、喷口流体以及热液区生物等热液产物, 明确海底热液活动的物质、能量输运及其与环境的关系, 揭示大生物和细菌的元素富集特征及其成矿机理, 分析硫化物和含金属沉积物等热液产物的资源潜力, 将了解海底热液活动在地球系统多圈层相互作用过程中的角色提供工作支撑, 无疑将推动海底热液地质学研究取得新的进展。

参 考 文 献

李家彪, 2017. 现代海底热液硫化物成矿地质学. 北京: 科学出版社, 328
 栾锡武, 2017. 现代海底热液活动. 北京: 科学出版社, 244
 曾志刚, 2011. 海底热液地质学. 北京: 科学出版社, 567
 曾志刚, 2020. 东太平洋海隆热液地质. 北京: 科学出版社, pp430
 Cai Y, Fan W, Zhou Y *et al*, 2012. Study on the high precision acoustic measurement techniques for determining temperature field around seafloor hydrothermal vent. *China Ocean Engineering*, 26(4): 723—732

Cao H L, Wang Y, Lee O O *et al*, 2014. Microbial sulfur cycle in two hydrothermal chimneys on the Southwest Indian Ridge. *mBio*, 5(1): e00980-13, doi: 10.1128/mBio.00980-13
 Chen S, Tao C H, Li H M *et al*, 2014. A data processing method for MAPR hydrothermal plume turbidity data and its application in the Precious Stone Mountain hydrothermal field. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(8): 34—43, doi: 10.1007/s13131-014-0406-9
 Chen X G, Yu M Z, Loh P S *et al*, 2020. A tidal-influenced hydrothermal system temporarily cooled by a tropical storm. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393: 106792, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2020.106792
 Dai Y, Ma F Y, Zhu X *et al*, 2019. Mechanical tests and numerical simulations for mining seafloor massive sulfides. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8): 252, doi: 10.3390/jmse7080252
 Fan L, Wang G Z, Tang X *et al*, 2014. Geochemical characteristics of basalts and hydrothermal sulfide deposits: 26°S mid-Atlantic ridge. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(S2): 152—153
 Han C H, Ye Y, Pan Y W *et al*, 2014. Spatial distribution pattern of seafloor hydrothermal vents to the southeastern Kueishan Tao offshore Taiwan Island. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(4): 37—44, doi: 10.1007/s13131-014-0405-x
 He Y, Feng X Y, Fang J *et al*, 2015. Metagenome and Metatranscriptome revealed a highly active and intensive sulfur cycle in an oil-immersed hydrothermal chimney in Guaymas Basin. *Frontiers in Microbiology*, 6: 1236, doi: 10.3389/fmicb.2015.01236
 Hou J L, Sievert S M, Wang Y Z *et al*, 2020. Microbial succession during the transition from active to inactive stages of deep-sea hydrothermal vent sulfide chimneys. *Microbiome*, 8: 102, doi: 10.1186/s40168-020-00851-8
 Hu J H, Liu S J, Zhang R Q, 2016. A new exploitation tool of seafloor massive sulfide. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 32(2): 101—104, doi: 10.1007/s41208-016-0014-x
 Ji F W, Zhou H Y, Yang Q H *et al*, 2017. Geochemistry of hydrothermal vent fluids and its implications for subsurface processes at the active Longqi hydrothermal field, Southwest Indian Ridge. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 122: 41—47, doi: 10.1016/j.dsr.2017.02.001
 Li J T, Cui J M, Yang Q H *et al*, 2017c. Oxidative weathering and microbial diversity of an inactive seafloor hydrothermal sulfide chimney. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1378, doi: 10.3389/fmicb.2017.01378
 Li H M, Lü X X, Tao C H *et al*, 2018a. Distribution of tetraether lipids in sulfide chimneys at the Deyin hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge: Implication to chimney growing stage. *Scientific Reports*, 8(1): 8060, doi: 10.1038/s41598-018-26166-1
 Li X H, Wang J Q, Chu F Y *et al*, 2018c. Variability of Fe isotope compositions of hydrothermal sulfides and oxidation products at mid-ocean ridges. *Journal of Marine Systems*,

- 180: 191—196, doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.11.015
- Li X H, Wang J Q, Chu F Y *et al*, 2018d. Zn isotopes in hydrothermal sulfides and their oxidation products along the south mid-Atlantic ridge: evidence of hydrothermal fluid deposition. *Geo-Marine Letters*, 38(2): 131—138, doi: 10.1007/s00367-017-0519-1
- Li X H, Wang J Q, Wang H, 2017a. Fe isotopic compositions of modern seafloor hydrothermal systems and their influence factors. *Journal of Chemistry*, 2017: 1417302, doi: 10.1155/2017/1417302
- Li B, Yang Y M, Shi X F *et al*, 2014. Characteristics of a ridge-transform inside corner intersection and associated mafic-hosted seafloor hydrothermal field (14.0°S, Mid-Atlantic Ridge). *Marine Geophysical Research*, 35(1): 55—68
- Li J T, Yang J Y, Sun M X *et al*, 2020a. Distribution and succession of microbial communities along the dispersal pathway of hydrothermal plumes on the Southwest Indian Ridge. *Frontiers in Marine Science*, 7: 581381, doi: 10.3389/fmars.2020.581381
- Li X, Zeng X, Qiu D H *et al*, 2019. Dissimilatory iron [Fe(III)] reduction by a novel fermentative, piezophilic bacterium *Anoxybacter fermentans* DY22613^T Isolated from East Pacific Rise hydrothermal sulfides. *Geomicrobiology Journal*, 36(4): 219—302, doi: 10.1080/01490451.2018.1526985
- Li L F, Zhang X, Luan Z D *et al*, 2018b. In situ quantitative Raman detection of dissolved carbon dioxide and sulfate in deep-sea high-temperature hydrothermal vent fluids. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(6): 1809—1823, doi: 10.1029/2018GC007445
- Li L F, Zhang X, Luan Z D *et al*, 2020b. Hydrothermal vapor-phase fluids on the seafloor: evidence from in situ observations. *Geophysical Research Letters*, 47(10): e2019GL085778, doi: 10.1029/2019GL085778
- Li J T, Zhou H Y, Fang J S *et al*, 2016. Microbial distribution in a hydrothermal plume of the Southwest Indian Ridge. *Geomicrobiology Journal*, 33(5): 401—415, doi: 10.1080/01490451.2015.1048393
- Liang J, Tao C H, Yang W F *et al*, 2018. ²³⁰Th/²³⁸U dating of sulfide chimneys in the Longqi-1 hydrothermal field, Southwest Indian Ridge. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(S2): 77—78
- Liao Q W, An Z, Huang H N *et al*, 2016. Ultra-high curie temperature (>800°C) low sintering temperature Bi_{2(1-x)}La_{2x}WO₆ piezoelectric material for the applications of seafloor hydrothermal vents detection. *Smart Materials and Structures*, 25(10): 10LT03, doi: 10.1088/0964-1726/25/10/10LT03
- Liao S L, Tao C H, Zhu C W *et al*, 2019. Two episodes of sulfide mineralization at the Yuhuang-1 hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge: insight from Zn isotopes. *Chemical Geology*, 507: 54—63, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.12.037
- Lin Y S, Lin H T, Wang B S *et al*, 2021. Intense but variable autotrophic activity in a rapidly flushed shallow-water hydrothermal plume (Kueishantao Islet, Taiwan). *Geobiology*, 19(1): 87—101, doi: 10.1111/gbi.12418
- Liu L L, Lu Z C, Ma D *et al*, 2020b. A new prediction method of seafloor hydrothermal active field based on wavelet neural network. *Marine Geophysical Research*, 41(4): 19, doi: 10.1007/s11001-020-09420-y
- Liu W, Zhang X L, Wang W G, 2020a. Microbial imprints on sulfide minerals in submarine hydrothermal deposits of the East Pacific Rise. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8): e2020JG005736, doi: 10.1029/2020JG005736
- Lou Y Z, He Z G, Han X Q, 2020. Transport and deposition patterns of particles laden by rising submarine hydrothermal plumes. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL089935, doi: 10.1029/2020GL089935
- Meng X W, Li X H, Chu F Y *et al*, 2018. Multi-stage growth and fluid evolution of a hydrothermal sulphide chimney in the East Pacific Ridge 1–2° S hydrothermal field: constraints from *in situ* sulphur isotopes. *Geological Magazine*, 156(6): 989—1002, doi: 10.1017/S0016756818000316
- Peng R H, Han B, Hu X Y, 2020. Exploration of seafloor massive sulfide deposits with fixed-offset marine controlled source electromagnetic method: Numerical simulations and the effects of electrical anisotropy. *Minerals*, 10(5): 457, doi: 10.3390/min10050457
- Peng S H, Hung J J, Hwang J S, 2011. Bioaccumulation of trace metals in the submarine hydrothermal vent crab *Xenograpsus testudinatus* off Kueishan Island, Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 63(5/12): 396—401
- Ren M Y, Chen J P, Shao K *et al*, 2016. Metallogenic information extraction and quantitative prediction process of seafloor massive sulfide resources in the Southwest Indian Ocean. *Ore Geology Reviews*, 76: 108—121
- Sun Z L, Cao H, Yin X J *et al*, 2018. Precipitation and subsequent preservation of hydrothermal Fe-Mn oxides in distal plume sediments on Juan de Fuca Ridge. *Journal of Marine Systems*, 187: 128—140
- Sun Z L, Cao H, Zou M L *et al*, 2016. Remnants of an powerful ancient “Dynasty”: material cycle and biomineralization in modern seafloor hydrothermal system. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(6): 2287—2288
- Sun X X, Yang Z S, Fan D J *et al*, 2014. Suspended zinc sulfide particles in the Southwest Indian Ridge area and their relationship with hydrothermal activity. *Chinese Science Bulletin*, 59(9): 913—923, doi: 10.1007/s11434-014-0118-8
- Sun Z L, Zhou H Y, Glasby G P *et al*, 2013. Mineralogical characterization and formation of Fe-Si oxyhydroxide deposits from modern seafloor hydrothermal vents. *American Mineralogist*, 98(1): 85—97
- Sun Z L, Zhou H Y, Yang Q H *et al*, 2012. Growth model of a hydrothermal low-temperature Si-rich chimney: example from the CDE hydrothermal field, Lau Basin. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1716—1730, doi: 10.1007/s11430-012-4485-1
- Tao C H, Chen S, Baker E T *et al*, 2017. Hydrothermal plume

- mapping as a prospecting tool for seafloor sulfide deposits: a case study at the Zouyu-1 and Zouyu-2 hydrothermal fields in the southern Mid-Atlantic Ridge. *Marine Geophysical Research*, 38(1): 3—16, doi: 10.1007/s11001-016-9275-2
- Tao C H, Li H M, Huang W *et al*, 2011. Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the 49°39'E hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge and their geological inferences. *Chinese Science Bulletin*, 56(26): 2828—2838, doi: 10.1007/s11434-011-4619-4
- Tao C H, Li H M, Jin X B *et al*, 2014. Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the southwest Indian ridge. *Chinese Science Bulletin*, 59(19): 2266—2276, doi: 10.1007/s11434-014-0182-0
- Tao C H, Seyfried W E Jr, Lowell R P *et al*, 2020. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge. *Nature Communications*, 11(1): 1300, doi:10.1038/s41467-020-15062-w
- Tao C H, Wu G H, Deng X M *et al*, 2013a. New discovery of seafloor hydrothermal activity on the Indian Ocean Carlsberg Ridge and Southern North Atlantic Ridge—progress during the 26th Chinese COMRA cruise. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(8): 85—88, doi: 10.1007/s13131-013-0345-x
- Tao C H, Wu T, Jin X B *et al*, 2013b. Petrophysical characteristics of rocks and sulfides from the SWIR hydrothermal field. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(12): 118—125, doi: 10.1007/s13131-013-0367-4
- Tian Y, Li W, Zhang A Q, 2013. A Lagrangian particle random walk model for simulating a deep-sea hydrothermal plume with both buoyant and non-buoyant features. *China Ocean Engineering*, 27(2): 215—230, doi: 10.1007/s13344-013-0019-7
- Wang T T, Chen Y S J, Tao C H, 2011. Revisit the K-segment of the Southeast Indian Ridge for new evidence of hydrothermal plumes. *Chinese Science Bulletin*, 56(33): 3605—3609
- Wang Y J, Han X Q, Petersen S *et al*, 2017d. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews*, 84: 1—19, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.12.020
- Wang Y J, Han X Q, Petersen S *et al*, 2018b. Trace metal distribution in sulfide minerals from ultramafic-hosted hydrothermal systems: examples from the Kairei vent field, Central Indian Ridge. *Minerals*, 8(11): 526, doi: 10.3390/min8110526
- Wang Y J, Han X Q, Qiu Z Y, 2017c. Source and nature of ore-forming fluids of the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge: evidence from He-Ar isotope composition and fluid inclusion study. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(1): 101—108, doi: 10.1007/s13131-016-0963-1
- Wang H, Li X H, Chu F Y *et al*, 2018a. Mineralogy, geochemistry, and Sr-Pb isotopic geochemistry of hydrothermal massive sulfides from the 15.2°S hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Marine Systems*, 180: 220—227, doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.02.010
- Wang S J, Li H M, Zhai S K *et al*, 2017a. Geochemical features of sulfides from the Deyin-1 hydrothermal field at the Southern Mid-Atlantic Ridge near 15°S. *Journal of Ocean University of China*, 16(6): 1043—1054
- Wang S J, Li H M, Zhai S K *et al*, 2017b. Mineralogical characteristics of polymetallic sulfides from the Deyin-1 hydrothermal field near 15°S, southern Mid-Atlantic Ridge. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(2): 22—34, doi: 10.1007/s13131-016-0961-3
- Wang H, Resing J A, Yan Q Y *et al*, 2021. The characteristics of Fe speciation and Fe-binding ligands in the Mariana back-arc hydrothermal plumes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 292: 24—36, doi: 10.1016/j.gca.2020.09.016
- Wang S J, Sun W D, Huang J *et al*, 2020a. Coupled Fe-S isotope composition of sulfide chimneys dominated by temperature heterogeneity in seafloor hydrothermal systems. *Science Bulletin*, 65(20): 1767—1774, doi: 10.1016/j.scib.2020.06.017
- Wang Y, Sun X M, Wu Z W *et al*, 2014. Helium and argon isotopic compositions of hydrothermal sulfides from Southwest Indian Ridge and their geological inferences. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(S2): 211—212
- Wang L S, Wang X F, Ye J *et al*, 2019b. Separation of uranium and thorium for ²³⁰Th-U Dating of submarine hydrothermal sulfides. *Journal of Visualized Experiments*, (147): e59098, doi: 10.3791/59098
- Wang S, Wu S J, Du M R *et al*, 2020c. A new serial sampler for collecting gas-tight samples from seafloor cold seeps and hydrothermal vents. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 161: 103282, doi: 10.1016/j.dsr.2020.103282
- Wang H, Yan Q Y, Yang Q H *et al*, 2019a. The size fractionation and speciation of iron in the Longqi hydrothermal plumes on the Southwest Indian Ridge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 4029—4043, doi: 10.1029/2018JC014713
- Wang H, Yang Q H, Ji F W *et al*, 2012. The geochemical characteristics and Fe(II) oxidation kinetics of hydrothermal plumes at the Southwest Indian Ridge. *Marine Chemistry*, 134/135: 29—35
- Wang X Y, Zeng Z G, Chen S *et al*, 2013. Rare earth elements in hydrothermal fluids from Kueishantao, off northeastern Taiwan: Indicators of shallow-water, sub-seafloor hydrothermal processes. *Chinese Science Bulletin*, 58(32): 4012—4020, doi: 10.1007/s11434-013-5849-4
- Wang H, Zhou H Y, Yang Q H *et al*, 2015. Development and application of a gas chromatography method for simultaneously measuring H₂ and CH₄ in hydrothermal plume samples. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(12): 722—730, doi: 10.1002/lom3.10061
- Wu Z W, Sun X M, Wang Y *et al*, 2014a. PGE and Os Isotopes as tracers in polymetallic massive sulfide deposits from the

- Edmond and Kairei hydrothermal fields, Central Indian Ridge. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(S2): 223—224
- Wu Z W, Sun X M, Xu H F *et al*, 2016b. Occurrences and distribution of “Invisible” precious metals in sulfide deposits from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Ore Geology Reviews*, 79: 105—132, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.05.006
- Wu T, Tao C H, Liu C *et al*, 2016a. Geomagnetic models and edge recognition of hydrothermal sulfide deposits at mid-ocean ridges. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34(7): 630—637, doi: 10.1080/1064119X.2015.1068893
- Wu S J, Xie K R, Yang C J *et al*, 2018. A novel visual apparatus for laboratory simulation of seafloor hydrothermal venting. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 140(6): 061201, doi: 10.1115/1.4041488
- Wu S J, Yang C J, Huang H C *et al*, 2014b. Development of an electric control gas-tight sampler for seafloor hydrothermal fluids. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 15(2): 120—129
- Wu S J, Yang C J, Pester N J *et al*, 2011. A new hydraulically actuated titanium sampling valve for deep-sea hydrothermal fluid samplers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 36(3): 462—469
- Xie Y, Wu S J, Yang C J, 2016. A thermoelectric cap for seafloor hydrothermal vents. *Energy Conversion and Management*, 109: 166—174
- Xu W, Guo S S, Pang K L *et al*, 2017. Fungi associated with chimney and sulfide samples from a South Mid-Atlantic Ridge hydrothermal site: distribution, diversity and abundance. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 123: 48—55, doi: 10.1016/j.dsr.2017.03.004
- Yang L Y, Hong H S, Guo W D *et al*, 2012. Absorption and fluorescence of dissolved organic matter in submarine hydrothermal vents off NE Taiwan. *Marine Chemistry*, 128/129: 64—71
- Yang B J, Liu J H, Shi X F *et al*, 2020. Mineralogy and sulfur isotope characteristics of metalliferous sediments from the Tangyin hydrothermal field in the southern Okinawa Trough. *Ore Geology Reviews*, 120: 103464, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103464
- Yang W F, Tao C H, Li H M *et al*, 2017. $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ dating of hydrothermal sulfides from Duanqiao hydrothermal field, Southwest Indian Ridge. *Marine Geophysical Research*, 38(1/2): 71—83
- Yang W F, Zhang X X, Chen M *et al*, 2016. Unusually low ^{234}Th in a hydrothermal effluent plume over the Southwest Indian Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(9): 3815—3824, doi: 10.1002/2016GC006580
- Yao H Q, Zhou H Y, Peng X T *et al*, 2015. Sr Isotopes and REEs geochemistry of anhydrites from L vent black smoker chimney, East Pacific Rise 9°N–10°N. *Journal of Earth Science*, 26(6): 920—928, doi: 10.1007/s12583-015-0545-8
- Ye J, Shi X F, Yang Y M *et al*, 2012. The occurrence of gold in hydrothermal sulfide at Southwest Indian Ridge 49.6°E. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(6): 72—82, doi: 10.1007/s13131-012-0254-4
- Yu M Z, Chen X G, Garbe-Schönberg D *et al*, 2019. Volatile chalcophile elements in native sulfur from a submarine hydrothermal system at Kueishantao, Offshore NE Taiwan. *Minerals*, 9(4): 245, doi: 10.3390/min9040245
- Yuan B, Yang Y M, Yu H J *et al*, 2018. Geochemistry of pyrite and chalcopyrite from an active black smoker in 49.6°E Southwest Indian Ridge. *Marine Geophysical Research*, 39(3): 441—461, doi: 10.1007/s11001-017-9324-5
- Yue X H, Li H M, Ren J Y *et al*, 2019. Seafloor hydrothermal activity along mid-ocean ridge with strong melt supply: study from segment 27, southwest Indian ridge. *Scientific Reports*, 9(1): 9874, doi: 10.1038/s41598-019-46299-1
- Zeng Z G, Chen S, Ma Y *et al*, 2017a. Chemical compositions of mussels and clams from the Tangyin and Yonaguni Knoll IV hydrothermal fields in the southwestern Okinawa Trough. *Ore Geology Reviews*, 87: 172—191, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.015
- Zeng Z G, Chen S, Selby D *et al*, 2014. Rhenium-osmium abundance and isotopic compositions of massive sulfides from modern deep-sea hydrothermal systems: Implications for vent associated ore forming processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 223—234
- Zeng Z G, Chen Z X, Zhang Y X *et al*, 2020b. Geological, physical, and chemical characteristics of seafloor hydrothermal vent fields. *Journal of Oceanology and Limnology*, 38(4): 985—1007
- Zeng Z G, Ma Y, Chen S *et al*, 2017b. Sulfur and lead isotopic compositions of massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems: Implications for ore genesis and fluid circulation. *Ore Geology Reviews*, 87: 155—171, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.014
- Zeng Z G, Ma Y, Yin X B *et al*, 2015a. Factors affecting the rare earth element compositions in massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(8): 2679—2693, doi: 10.1002/2015GC005812
- Zeng Z G, Niedermann S, Chen S *et al*, 2015b. Noble gases in sulfide deposits of modern deep-sea hydrothermal systems: implications for heat fluxes and hydrothermal fluid processes. *Chemical Geology*, 409: 1—11
- Zeng Z G, Wang X Y, Chen C T A *et al*, 2013. Boron isotope compositions of fluids and plumes from the Kueishantao hydrothermal field off northeastern Taiwan: implications for fluid origin and hydrothermal processes. *Marine Chemistry*, 157: 59—66
- Zeng Z G, Wang X Y, Chen C T A *et al*, 2018b. Understanding the compositional variability of the major components of hydrothermal plumes in the Okinawa Trough. *Geofluids*, 2018: 1536352, doi: 10.1155/2018/1536352
- Zeng Z G, Wang X Y, Murton B J *et al*, 2020a. Dispersion and intersection of hydrothermal plumes in the Manus back-arc basin, western Pacific. *Geofluids*, 2020: 4260806, doi:

- 10.1155/2020/4260806
- Zeng Z G, Wang X Y, Qi H Y *et al*, 2018a. Arsenic and antimony in hydrothermal plumes from the eastern Manus basin, Papua New Guinea. *Geofluids*, 2018: 6079586, doi: 10.1155/2018/6079586
- Zeng X, Zhang Z, Li X *et al*, 2015c. *Caloranaerobacter ferrireducens* sp. nov., an anaerobic, thermophilic, iron (III)-reducing bacterium isolated from deep-sea hydrothermal sulfide deposits. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65(Pt 6): 1714—1718, doi: 10.1099/ijs.0.000165
- Zhang X, Du Z F, Zheng R E *et al*, 2017a. Development of a new deep-sea hybrid Raman insertion probe and its application to the geochemistry of hydrothermal vent and cold seep fluids. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 123: 1—12, doi: 10.1016/j.dsr.2017.02.005
- Zhang W, He Z G, Jiang H S, 2017b. Scaling for turbulent viscosity of buoyant plumes in stratified fluids: PIV measurement with implications for submarine hydrothermal plume turbulence. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 129: 89—98, doi: 10.1016/j.dsr.2017.10.006
- Zhang X, Li L F, Du Z F *et al*, 2020c. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system. *Science Bulletin*, 65(11): 958—964, doi: 10.1016/j.scib.2020.03.023
- Zhang B S, Li Z Q, Hou Z Q *et al*, 2018a. Mineralogy and chemistry of sulfides from the Longqi and Duanqiao hydrothermal fields in the Southwest Indian Ridge. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(5): 1798—1822
- Zhang X B, Lin J, Jiang H S, 2019b. Time-dependent variations in vertical fluxes of hydrothermal plumes at mid-ocean ridges. *Marine Geophysical Research*, 40(3): 245—260, doi: 10.1007/s11001-018-9364-5
- Zhang X N, Song S J, Li J B *et al*, 2013. Robust LS-SVM regression for ore grade estimation in a seafloor hydrothermal sulphide deposit. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(8): 16—25, doi: 10.1007/s13131-013-0337-x
- Zhang W Q, Sun X X, Fan D J *et al*, 2020a. The mineral composition and sources of the fine-grained sediments from the 49.6°E hydrothermal field at the SWIR. *Journal of Ocean University of China*, 19(1): 60—68, doi: 10.1007/s11802-020-3797-6
- Zhang L, Sun Z L, Geng W *et al*, 2019a. Advances in the microbial mineralization of seafloor hydrothermal systems. *China Geology*, 2: 227—237
- Zhang H, Wang H, Liu R *et al*, 2018c. Cloning and characterization of a leucine aminopeptidase from *Pseudoalteromonas telluritireducens* DSM 16098, a strain isolated from hydrothermal vents fluid. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 138: 114—121, doi: 10.1016/j.dsr.2018.06.006
- Zhang X, Zhai S K, Yu Z H, 2020b. Strontium isotope compositions of hydrothermal barite from the Yonaguni IV: Insight into fluid/sediment interaction and barite crystallization condition. *Journal of Ocean University of China*, 19(2): 377—385, doi: 10.1007/s11802-020-4021-4
- Zhu C W, Tao C H, Yin R S *et al*, 2020a. Seawater versus mantle sources of mercury in sulfide-rich seafloor hydrothermal systems, Southwest Indian Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 281: 91—101, doi: 10.1016/j.gca.2020.05.008
- Zhu F C, Sun J, Yan G Y *et al*, 2020b. Insights into the strategy of micro-environmental adaptation: transcriptomic analysis of two alvinocaridid shrimps at a hydrothermal vent. *PLoS One*, 15(1): e0227587, doi: 10.1371/journal.pone.0227587

PROGRESS AND PROSPECT IN CHINA IN RESEARCH TO SUBMARINE HYDROTHERMAL ACTIVITIES

ZENG Zhi-Gang^{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. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Investigation and study on submarine hydrothermal activity is one of the key tasks for deep-sea entry, deep-sea exploration, and deep-sea development. In the past 10 years, Chinese scientists have discovered several new submarine hydrothermal fields in the western Pacific, the Eastern Pacific Rise, the Mid-Atlantic Ridge, and the Indian Ridge, and carried out many investigations on hydrothermal products including sulfide, vent fluid, hydrothermal plume, and organism in hydrothermal fields. At present, Chinese scientists has established submarine hydrothermal geology, and they proposed a hypothesis that hydrothermal activity, cold spring, and gas hydrate are originated from a same methane source but situate in different methane sinks. Based on above researches, Chinese scientists have made many research achievements in this field, and published monographs of *Submarine Hydrothermal Geology*, *Modern Seafloor Hydrothermal Sulfide Metallogenic Geology*, *Modern Seafloor Hydrothermal Activity*, and *Submarine Hydrothermal Geology of the East Pacific Rise*, etc. In the future, it is important to focus continuously on the sub-seafloor geologic process of hydrothermal activity and the key issues of its resource and environmental effects, to develop the detection technology of submarine hydrothermal activity, to reach out to the polar regions, and to carry out systematic projects on hydrothermal products such as chimney, hydrothermal plume, metalliferous sediment, vent fluid, and hydrothermal organism, which will undoubtedly promote new waves of development in submarine hydrothermal geology.

Key words submarine hydrothermal activity; deep-sea research; exploration technology; research prospect