



中国大洋硫化物勘探研究的发展与展望

刘 颖^{1,2}, 李家彪³, 王叶剑³, 陶春辉³, 曾志刚⁴, 韩喜球³, 李传顺⁵, 周亚东³, 梁 锦³

- (1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国大洋矿产资源研究开发协会办公室, 北京 100860;
3. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;
4. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;
5. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘 要: 海底热液系统的发现催生了全球大洋多金属硫化物成矿、海底极端生态系统和多圈层相互作用等研究新领域。本文重点从大洋热液硫化物的全球发现、我国大洋硫化物勘探研究的发展历程和技术创新、未来勘探开发的研究热点等方面探讨我国大洋硫化物勘探研究成果和世界发展趋势, 提出我国应持续发展大洋多金属硫化物勘探开发理论研究, 突破智能、重载、协同、绿色勘探开发技术, 迎接未来商业开采时代的到来。

关键词: 大洋; 多金属硫化物; 海底极端生态系统; 热液系统; 勘探技术

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2624-14

中图分类号: P67

文献标志码: A

引文格式: 刘 颖, 李家彪, 王叶剑, 等. 中国大洋硫化物勘探研究的发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2624–2637. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37992

LIU Ying, LI Jia-biao, WANG Ye-jian, et al. Development and prospect of exploration and research on seafloor polymetallic sulfides of China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2624–2637. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37992

自 1977 年科学家使用 Alvin 号载人深潜器在加拉帕格斯扩张中心观测到海底热液活动现象以来, 人类对热液活动的研究已有 40 多年的历史^[1]。高温“黑烟囱”和低温“白烟囱”热液系统被认为发育于所有深海活动带, 在大洋中脊和弧后盆地中分布较广。海底热液活动形成的多金属硫化物、来自深部的流体喷发、羽流扩散和再沉积, 以及多种多样的生物活动等独特的自然现象, 使得海底热液活动及其资源效应成为当代海洋科学研究的重要前沿领域之一^[2-4]。自 2005 年起, 中国科研工作者系统地开展洋中脊海底热液活动的调查和研究, 不仅在探测和勘探方面积累了大量技术基础, 在热液羽流探测、热液生态系统和生物基因资源, 以及热液成

矿等方面也取得了许多代表性成果。本文重点从多金属硫化物勘探研究发展与展望的角度, 对我国多金属硫化物资源勘探和研究的重大成果进行总结, 并对未来发展方向和研究重点进行展望。

1 深海热液硫化物与热液生态系统

1.1 深海热液硫化物资源勘探研究的重要意义

21 世纪, 人类进入深度探索的新时代。“深空、深海、深地”这些人类的认知边界正在不断被突破, 新的知识不断涌现, 为人类探索未知空间和资源提供了新的机遇。2015 年 12 月 12 日, 《巴黎气候变化协定》得以通过^[5], 提出了向低碳社会转变的要

基金项目: 中国大洋协会项目(DY135-G2-1)

收稿日期: 2021-06-03; **修订日期:** 2021-08-31

通信作者: 李家彪, 研究员, 博士; 电话: 0571-81963306; E-mail: jbli@sio.org.cn

求, 从而带来大量使用金属矿产资源的新需要^[6]。与此同时, 2015 年 9 月公布的《联合国可持续发展 2030 年目标》也对基础设施建设提出了更多矿产资源需求^[7]。海底块状硫化物矿床(Seafloor massive sulphide deposits, SMS)因富含多种金属元素, 尤其是 Cu 和 Au, 在未来可能成为陆地资源的替代而备受矿业公司的关注^[8-10]。SMS 型矿床的经济价值主要根据 Cu 和 Au 含量确定。同时, 矿床中许多其他金属(如 Ag、Zn 和 Pb 等)也可以作为副产品开发利用。

开展大洋多金属硫化物找矿勘探, 加强多学科综合攻关, 重点开展硫化物的分布规律、形成机理、成矿对比和成矿模拟研究, 了解关键金属的迁移过程, 建立区分多金属硫化物生物和非生物形成过程的指标体系, 揭示元素富集的条件及深部成矿环境特点, 深入认识多金属硫化物的形成条件和过程, 建立和完善海底热液综合、多要素成矿模式, 为我国在国际海底区域的多金属硫化物资源找矿勘探提供研究支撑, 促进我国海底热液成矿地质学发展^[11]。提高我国海底多金属硫化物资源的战略储备, 深化陆地火山成因块状硫化物矿床(VMS)矿床的成因认识, 加强海底资源环境的探测、认知水平, 是国家战略性矿产资源开发的重要组成部分。

1.2 热液系统与极端生命

深海热液区无光、高温、高压、低 pH、高浓度还原性物质及重金属离子对人类所熟知的几乎所有生物都是严峻挑战。在这种极端环境下, 一些特殊的微生物通过化能合成作用利用热液中的 H_2S 、 CH_4 、 H_2 等还原性气体, 同时固定 CO_2 以合成糖等有机物供后续生态系统中的其他消费者使用^[12]。这些极端微生物完成了将地球内部物质和能量向动物的传递, 并支撑了热液区密集而独特的动物群落。而后者又成为了深海热液区独特地貌之外的另一个标志性特征^[13]。热液区部分动物通过与其体内共生微生物(内共生或体表共生)形成密切的“营养合作”关系^[13-14]。另有一部分动物则以热液区自由生活的微生物形成的有机颗粒为食(如小型帽贝 *Eulepetopsis* spp.), 但不排除某些动物能同时利用沉降的有机颗粒物为食, 如广泛分布的深海偏顶蛤 *Bathymodiolus* spp.^[13]。

热液生物对热液区高度依赖, 一方面在行为、生理构造上的特化使其高度适应极端环境^[13-14]; 另一方面对于环境梯度的影响表现可能非常敏感^[15-17]。热液生物的这种特性使其被认为是一种壮观但极端脆弱的生态系统, 并引发高度关注^[18]。除了高密度、高生物量等特点之外, 热液区生物群落还具有高优势度和低物种多样性的特征, 主要表现为少数优势种所占比例极高^[19]。尽管如此, 全球范围内仍然报道超过了 750 种热液生物, 其中甲壳动物、软体动物以及环节动物构成了热液区特有生物种最优势的三个类群^[13]。在全球尺度上观察, 不同洋脊系统、不同洋盆的热液生物群落往往差异显著, 各自具有特征性的生物组成^[20], 例如, 东太平洋海隆的巨型管栖蠕虫(*Riftiapachyptila*), 北大西洋中脊的盲虾(*Rimicarisexoculata*)和印度洋中脊的鳞足螺(*Chrysomallonsquamiferum*)等。基于物种组成数据和严格的统计分析, 这些热液区被分为 11 个生物省^[21]。各生物省的地理范围基本与各洋脊系统或洋盆吻合, 表明地质构造及过程是塑造全球热液生物多样性格局的主要控制因素之一^[22]。后续进一步对该多样性格局的精细描述, 将清晰的揭示各个区域热液区生物群落的独特性和不可替代性, 同时为全球尺度下特定区域热液区的重要性评估提供关键依据。

1.3 海底热液硫化物的分布

现代海底多金属硫化物是由于加热而参加深部循环的海水与洋壳相互作用而在海床上或下面形成的含金属的矿物沉积产物, 被广泛认为是未来可供开发利用的金属资源^[23]。自全球首个海底热液喷口被发现以来, 多金属硫化物矿床受到学术界和产业界的普遍关注。截止 2020 年, 全球已在现代海底板块边界发现了 390 个多金属硫化物区或矿点^[24], 表明这种类型的海底矿化广泛存在。它们主要分布在不同扩张速率的洋中脊(50%)、弧后扩张中心(23%)、火山弧(25%)和板内火山(8%)等构造环境, 其中的三分之二位于主权国家的专属经济区(EZZ), 三分之一位于国际海底区域(the Area)。从矿床所处的海域来看(见图 1), 它们主要分布在太平洋, 其次为大西洋和印度洋, 并且主要集中在中低纬度区域。与之相比, 由于高纬度海域海况普遍较

差,例如环南极洋中脊海域位于南大洋西风带,北冰洋的 Gakkel 洋脊海域常年被冰覆盖,矿床调查难度较大,发现数量相对较少。

在洋中脊区域,多金属硫化物矿床的出现平均频率约为 1 个/100 km^[25]。基于对海底热液羽状流探测频率计算模型,前人认为多金属硫化物矿床的数量和分布与洋中脊的扩张速度大致呈正相关关系^[26],例如,与快速扩张洋脊(如东太平洋海隆)相比,慢速扩张洋脊(如大西洋中脊)的矿床数量相对较少,间距相对较大,但是矿床规模要更大^[27]。这一观点反映在政府和产业界最近越来越多的洋中脊勘探活动中,例如国际海底区域的 7 个多金属硫化物勘探合同区有 4 个位于印度洋中脊,3 个位于北大西洋中脊(见图 1)。

2 我国大洋硫化物勘探研究的发展历程

2.1 中国加入 InterRidge

国际大洋中脊协会(International cooperation in Ridge-crest studies, InterRidge) 成立于 1992 年,现有成员国 20 个,会员 1600 余名,其宗旨为促进各

成员国开展洋中脊海底活动的跨学科交叉研究及国际合作(据 InterRidge 网站, <https://www.interridge.org/>)。我国于 2003 年正式加入 InterRidge, 并成立 InterRidge China 及秘书处,从而推动了我国大洋中脊的科学研究和知识传播。加入 InterRidge 近 20 年以来,我国积极参与了 InterRidge 十年计划科学目标的制定,举荐国内学者发起或参加其下设的学科工作组,推荐青年学者和研究生获得国际交流奖学金,推动了大洋中脊国际联合航次的执行,并主办了多次国际学术研讨会,极大促进了我国在大洋中脊科学研究领域的国际交流。2013~2015 年,中国成为 InterRidge 轮值主席国,由陈永顺教授和李家彪研究员任该组织的共同主席。

2.2 中国启动全球洋中脊硫化物计划

大洋中脊是全球性联通的构造活动强烈的巨型海底山脉。人类对大洋中脊发育的热液系统、硫化物成矿及独特的热液生态系统和极端环境等问题认识十分有限,是公认的国际前沿,我国如能尽早布局研究,极有可能在该领域弯道超车。为此,当时唯一领导我国深海调查研究的中国大洋矿产资源研究开发协会(以下简称“中国大洋协会”),

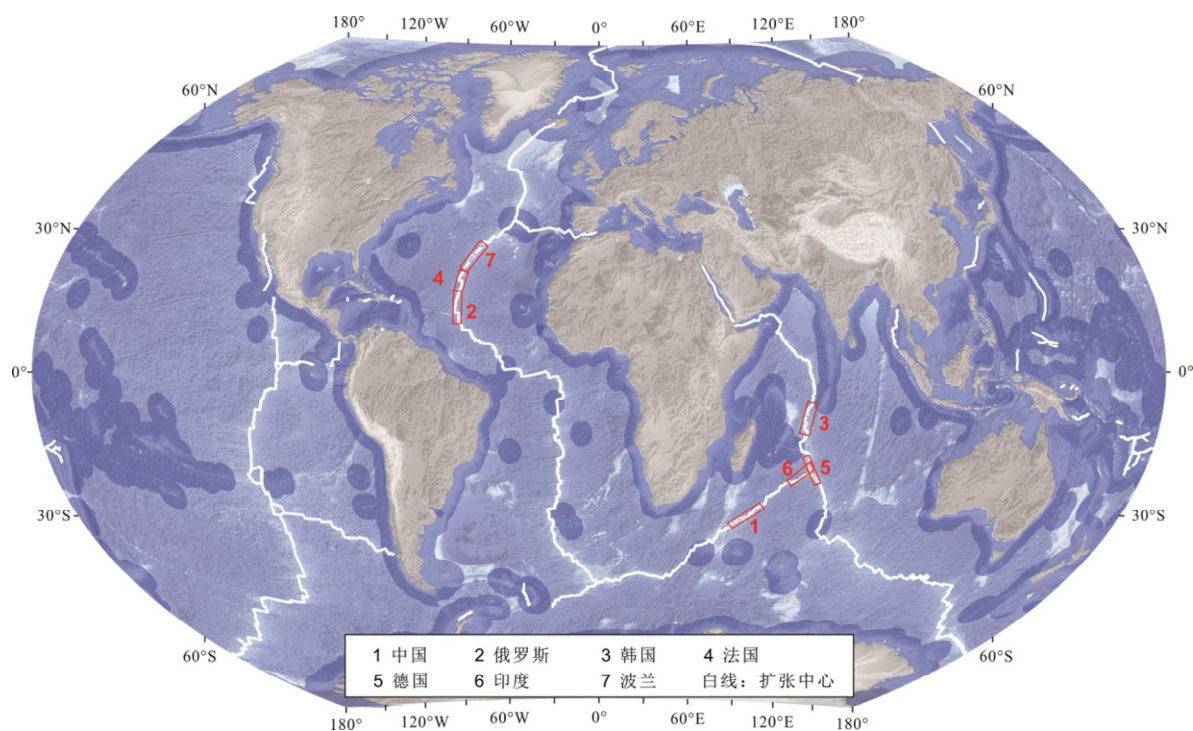


图 1 国际海底区域多金属硫化物合同区分布位置示意图

Fig. 1 Location of polymetallic sulfide contract areas in International Seabed Area

正式启动了我国延续至今的新的研究计划“大洋中脊与硫化物资源综合调查研究”。经过 15 年连续三期计划的调查研究,我国已在全球各大洋开展多金属硫化物调查工作并取得重要发现,从而为全球各类洋中脊多金属硫化物分布特征和成矿规律的综合对比研究创造了条件。

2.3 我国第一次大洋中脊环球航次

在 2005 年暨庆祝“郑和下西洋 600 周年”之际,我国组织了首次以大洋中脊及其硫化物资源为主要目标的环球科考,全面开启了大洋中脊硫化物资源调查。该航次由中国大洋协会组织实施,原国家海洋局第二海洋研究所、北海分局、第三海洋研究所、国土资源部广州海洋地质调查局、青岛海洋地质研究所、中国科学院海洋研究所、广州地球化学研究所、声学研究所、北京大学以及美国伍兹霍尔海洋研究所、德国莱布尼兹海洋研究所、德国海洋科学联盟、美国佐治亚大学等二十余家国内外学术机构的近 120 名科学家和工程技术人员参与。该航次自 2005 年 4 月 2 日至 2006 年 1 月 22 日期间由“大洋一号”科学考察船执行,先后跨越了太平洋、大西洋、印度洋,完成了地质、地球物理、地球化学、水文、生物等多学科的综合科考,并取得了丰硕的调查结果。我国首次在西南印度洋中脊 49.6°E 探测到海底热液羽状流异常;首次利用国产化设备获得了海底热液喷口及其生物群落的影像资料;第一次在快速、中速、慢速扩张洋中脊系统采集到完整的热液硫化物烟囱体、热液生物和热液沉积物等样品等。该航次的成功实施标志着我国实现了由单一的太平洋考察区域向三大洋的扩展,实现了由单一的多金属结核资源调查向多种资源综合调查转变,为后续我国在大洋中脊开展多金属硫化物调查积累了宝贵经验和历史资料。

2.4 我国三大洋硫化物勘探研究

自 2005 年环球航次开始,我国持续开展了布局太平洋、印度洋和大西洋的多金属硫化物找矿勘探与理论研究。

1) 太平洋区域

我国在东太平洋海隆和西南太平洋劳海盆的硫化物找矿勘探和理论研究已有近 20 年的历史,

先后 7 次调查了东太平洋海隆 13°N、1-2S°和劳海盆的海底热液活动及其成矿特征,获得了一批宝贵的样品、数据和资料。

2003 年以来,我国先后在东太平洋海隆的热液活动区进行了 6 次海上调查,并将东太平洋海隆作为地球系统的窗口,从分析热液硫化物和玄武岩的矿物、元素和同位素组成^[28-29],提出海底热液活动、冷泉及天然气水合物的同源异汇假说^[30-31],揭示蚀变玄武岩中矿物的化学组成变化^[32],阐述海底热液活动对水体和沉积环境的影响状况,剖析海底热液循环系统及其成矿模式,构建 Fe-羟基氧化物成因模式^[33],以及论述硫化物的资源潜力及其人工富集和开采利用设想等多个角度开展了东太平洋海隆热液地质研究^[34-35],并通过研究硫化物的同位素组成、稀有气体和稀土元素组成^[28, 36-40],系统揭示了海底硫化物的同位素组成特征及其物质来源,取得了一批新认识^[30]。

我国于 2007 年 5 月对劳海盆开展了海底热液活动及其多金属硫化物调查。我国学者分析了劳海盆中、南 ValuFa 脊的热液 Fe-Mn-Si 氧化物^[41],检测了劳海盆热液喷口中的嗜热菌富集情况^[42],研究了劳海盆 CDE 热液区中低温富铁-硅热液产物的微生物多样性和生物成矿作用^[43],建立了低温富硅烟囱体的生长模型^[44],探讨了劳海盆 ValuFa 脊热液区中 Fe-Mn-Si 氧化物和绿脱石的成因^[44],揭示了硫化物中铜和金选择性富集的机理^[45]。

2) 印度洋区域

在 2005 年首次环球航次发现的基础上,通过对印度洋洋中脊典型热液区多金属硫化物的勘探与研究,我国对于该区典型热液区硫化物成矿规律获得了诸多认识。在西南印度洋,国际上首个被确认的超慢速扩张脊活动热液区-龙旂热液区,是受深大拆离断层控制,该区域发育两条成矿带^[46];发现断桥热液区周期性热液活动与岩浆(轴部岩浆房的存在)和构造共同作用相关,玉皇热液区具有玄武岩、超基性岩共同物质来源,并有生物来源硫的参与,从而建立了超慢速扩张脊的热液循环模型,揭示了超慢速扩张脊热液活动的多样性和成矿潜力,突破了西南印度洋等超慢速扩张洋中脊难以发育热液硫化物的传统观点^[47-49]。在西北印度洋卡尔斯伯格脊,我国科学家首次发现了卧蚕 1 号、卧蚕 2

号、天休与大糟等多个热液区, 并进行了载人深潜器、水下自主机器人近底精细调查和钻探采样, 揭示了构造和岩浆作用特征, 分别建立了慢速扩张洋中脊强和弱岩浆供给和拆离断层控制型等三种热液成矿模式^[50-54]。

3) 大西洋区域

自 2005 年我国开启南大西洋中脊热液成矿作用的研究, 提出南大西洋中脊热液硫化物成矿地质条件与北大西洋中脊具有较大相似性。2009 年以来, 我国先后组织实施了 6 个调查航次, 对南大西洋中脊 12°S~30°S 脊段开展了海底热液成矿作用综合调查, 自主发现了包括骆虞、太极、采繁、德音、洵美等多处热液区^[50, 55-58]。结合国际上在南大西洋发现的其他热液区, 南大西洋中脊海底热液区的产出环境主要可分为三类: 裂谷内的新火山区、非转换不连续带及附近离轴脊段、洋中脊-转换断层相交的内角高地。此外, 我国围绕南大西洋中脊的热液成矿作用开展了包括矿液来源、矿化类型与机理、成矿年代学等综合研究。通过对南大西洋中脊德音、洵美热液区赋矿围岩中熔体包裹体序列的能谱研究, 发现存在大量黄铜矿和黄铁矿的成矿金属子矿物, 表明岩浆期后热液携带成矿金属沉淀成矿^[59]。研究还发现洋壳渗透性差异影响热液产物矿化类型, 洋壳渗透性较好的区(如太极区)主要以角砾矿化和网脉矿化为主, 洋壳渗透性差的区(如彤管区)以块状矿化和烟囱体为主。烟囱体生长过程中, 流体主要为弱酸性低氧逸度流体并向弱碱性过渡。

2.5 我国大洋多金属硫化物矿区申请

自 2005 年开始, 我国系统开展大洋中脊热液硫化物资源的调查研究。历经十多个航次, 在全球三大洋中脊(太平洋、大西洋和印度洋)累计发现了三十多处热液区/硫化物区。在此基础上, 中国大洋协会成功申请了西南印度洋多金属硫化物矿区, 并于 2011 年 11 月与国际海底管理局签订了为期 15 年的勘探合同。这是世界上第一份多金属硫化物勘探合同, 并已在该合同区勘探发现龙旗、断桥和玉皇等系列大规模的热液硫化物区, 显示出合同区具有良好的资源前景^[60]。根据《“区域”内探矿和勘探规章》的要求, 中国大洋协会于 2019 年完成了第一次区域放弃义务(即放弃原获分配区域面积的

50%), 并将在 2021 年 11 月提交第二次区域放弃方案(即完成原获分配区域面积的 75%), 完成相关义务。

3 我国大洋硫化物勘探技术与理论的系统创新

3.1 热液硫化物成矿理论研究

根据海底热液羽状流特征、地球物理、地球化学、生物及矿化露头等信息, 综合地形、地质、地球物理、地球化学和生物等找矿标志, 建立了与之对应的找矿概念模型与成矿预测模型^[61-62]。基于洋中脊硫化物资源评价方法体系, 系统分析研究区地形、构造、异常等多元数据, 总结成矿规律, 建立了适用于超慢速扩张洋中脊 SMS 矿床的定量预测模型^[63]。

近年来, 围绕超慢速扩张洋脊岩浆-构造活动深部过程, 我国在西南印度洋中脊多金属硫化物成矿方面取得了一系列成果。首次在西南印度洋中脊龙旗和断桥热液区开展海底 OBS 三维地震探测, 获得该区高精度的深部地壳结构声学成像, 并在龙旗热液区发现大型拆离断层, 在断桥热液区发现超大规模的岩浆供给^[64-65]; 提出拆离断层控制型的地幔传导热驱动的热液循环新模型^[46]。阐明局部岩浆供给充足、渗透率合适是有利于硫化物发育的新机制^[66]; 揭示典型热液区深达 13 km 的拆离断层经历了长达 1.4 Ma 的构造活动, 提出由于拆离断层更深、拆离时间更长而更易形成大型硫化物矿区的观点^[67]; 在“龙旗”、“玉皇”等热液区探测到大规模的硫化物^[68]。

3.2 深海近底精细勘查技术研发

自 2011 年首获多金属硫化物勘探合同以来, 我国在羽状流及水体异常探测、电视抓斗取样等常规调查基础上, 利用加密光声学深海拖体、“潜龙”系列无人自主潜水器(AUV)、“海龙”系列无人有缆潜水器(ROV)近底探测和“蛟龙号”载人深潜器(HOV)等近底精细调查技术手段(见图 2), 在合同区新发现一系列异常区和矿化区^[61]。随着人们越来越重视已消亡和离轴海底多金属硫化物矿床的资源潜力, 从而极大刺激了隐伏硫化物矿体快速勘探技

术的发展。AUV 是目前海底多金属硫化物勘探的主要技术代表,可携带各种物理和化学传感器,如多波束测深仪、磁力仪、摄像机、温度、浊度、粒度仪等。由于其通用性强、效率高、安全性好,使得 AUV 成为寻找和研究海底热液成矿系统的重要设备^[61]。为了更有效、更快速地进行高质量的调查,现在正在发展多个 AUV 集群自主协同探测并进行组网通信,实现更多参数、更大覆盖的调查。欧洲 Blue Mining 项目利用 AUV 以 2 m 到 0.5 m 的分辨率对 47 km² 的 TAG 热液区及其邻近区域进行了探测,确定了一系列不活动的硫化物矿体^[69]。然而,这一探测方式所覆盖的范围小、效率低,因此,多 AUV 协同作业可能是未来实现全球海底多金属硫化物资源评估的现实选择。

在发现硫化物矿体位置后,需要获得其海底展布信息开展资源评价。直接有效的手段是开展海底钻探,但非常昂贵和困难,因此,迫切需要开发新的地球物理手段探测评估硫化物矿床的厚度。最近,欧盟科学家在 TAG 热液区开展的地震^[70]与电磁^[71]探测很好地提供了硫化物矿化的深部信息。自然电位成像技术因能识别非活动热液区边界,同样为海底硫化物资源量的估算提供了新的手段。我国学者通过搭载在 AUV 上的自然电位电极来反演玉

皇热液区内硫化物矿的海底三维结构^[68]。因此,未来在硫化物勘探方面进行综合性近底地球物理探测,开展多物理场资料的联合反演,可有效降低单一地球物理方法解释所伴随的多解性,从而提高海底多金属硫化物矿床成像的精确度。

3.3 成矿深部探测技术

除了对海底地形、海底表层沉积物的物化探调查之外,硫化物矿体深部特征研究对于构建成矿模型、估算资源量,以及研究热液成矿期次等都具有非常重要的意义,这些离不开成矿深部探测技术的不断发展和进步,是学科交叉解决大洋硫化物勘探的创新实践。如针对不同洋脊段的地球物理特征,从热液硫化物形成机理、岩浆-构造作用、地壳深部特征出发,分析热液硫化物区磁性异常,构建相应的地磁模型,根据海底硫化物与围岩和沉积物的电阻率和磁化率等物理性质存在明显差别,估算硫化物资源量。

海底地震是探测地球深部的有效方法,通过人工震源和天然震源方法,接收来自海面人工激发和岩石圈内天然地震,可以获得分辨率更高的地壳/上地幔深部结构信息。为探索热液活动区深部地壳和上地幔结构,寻找地壳内的岩浆房或熔融体,以

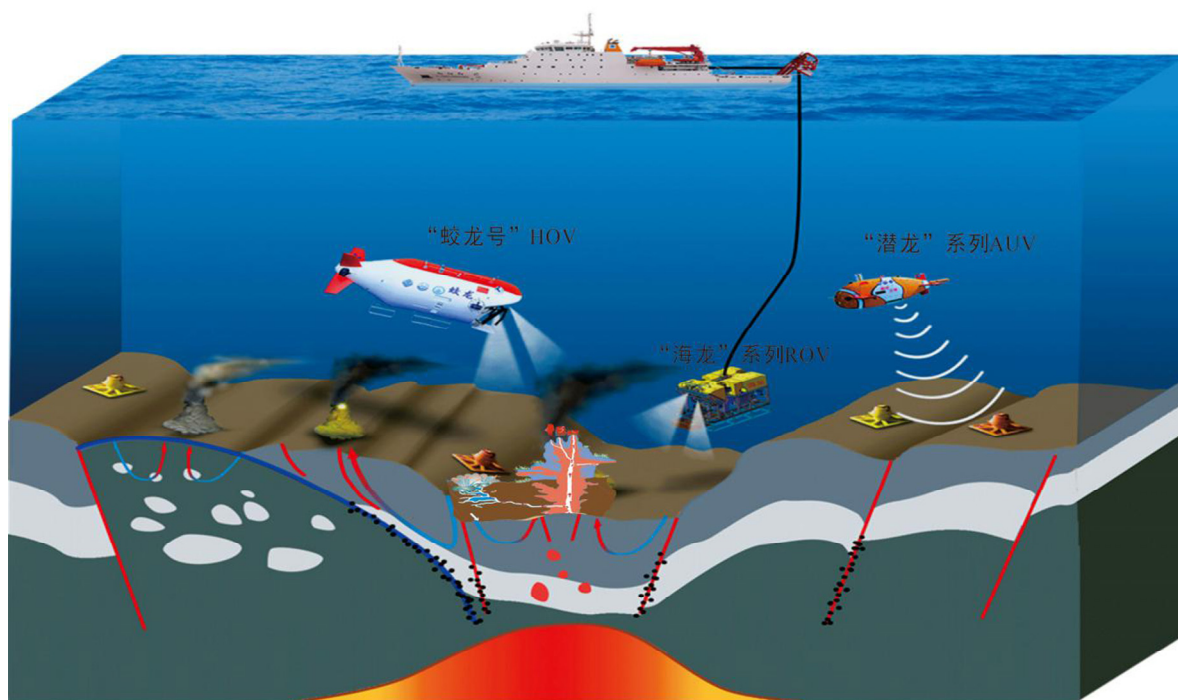


图2 我国自主设计建造的“三龙”装备体系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of "Three Dragons" equipment systems designed and built by China independently

及大型基底拆离断层,为多金属硫化物矿区的成矿模式和前景评估提供科学证据。2010年,我国实施完成了全球首次在西南印度洋中脊的人工震源三维海底地震探测。该航次通过中法合作,使用了5种型号的海底地震仪,共40台OBS,其中中国23台,法国17台。采用总容量6000立方英寸的大容量气枪阵列组合。从2010年2月7日到2月20日,实现连续放炮作业14天,总计100832炮记录,创造了我国洋中脊大规模人工源海底地震调查的新纪录。天然地震探测发现,龙旂热液区的岩石圈是冷的厚的,发育的犁式基底拆离断层直接延伸到地幔,而断桥热液区岩石圈出现地震空白区,与这里大量岩浆供给有关^[72]。而人工源三维地震揭示,龙旂热液区存在大规模大洋核杂岩和相关的基底拆离断层,断桥热液区具有超厚地壳和较浅的岩浆房^[73]。

4 大洋硫化物勘探研究的前沿热点

4.1 热液硫化物近底实时勘查技术

为解决大范围AUV集群探测的通信难题,日本引入了海面无人自主机器人(Autonomous surface vehicle, ASV)的概念^[74]。由于水下通信距离较短,ASV的一个重要作用是中继水下和空中通信。ASV自动跟踪AUV,以保持声学通信范围,并使用无线电波向调查船提供AUV信息,使得AUV可在离调

查船较远的位置进行作业,同时另一个由调查船直接通信的AUV在船体附近作业。这一试验验证了更多数量AUV的协同作业可以实现高效、大范围的调查。

海底长期观测技术是研究地球内部时空演变规律的重要手段。为了研究热液区长期演化特征及规律,美国NeMO海底观测站^[75]和加拿大NEPTUNE观测网分别对胡安德富卡脊Virgin等热液区和Endeavour热液区^[76]开展了海底温度、压力、地震等参数的长期观测。德国不莱梅大学则在大西洋Logatchev热液区开展了温度、微震和斜度的长期观测^[77]。借助长期观测结果,发现了热液系统的间歇性活动规律及其对地震、岩浆侵入事件的响应过程^[78-80]。

此外,海底热液实时探测技术和多金属硫化物等热液产物原位测试方法的发展,可提高对海底热液区的多圈层介质以及热液循环、生物活动的持续观测与研究水平。监测和了解海底热液系统的物理结构、化学组成、地质过程和生物多样性,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。

4.2 多圈层地质-生物耦合成矿理论

在全球洋中脊、弧后盆地和岛弧裂谷等张性构造环境普遍发育海底热液系统,海底热液循环把水

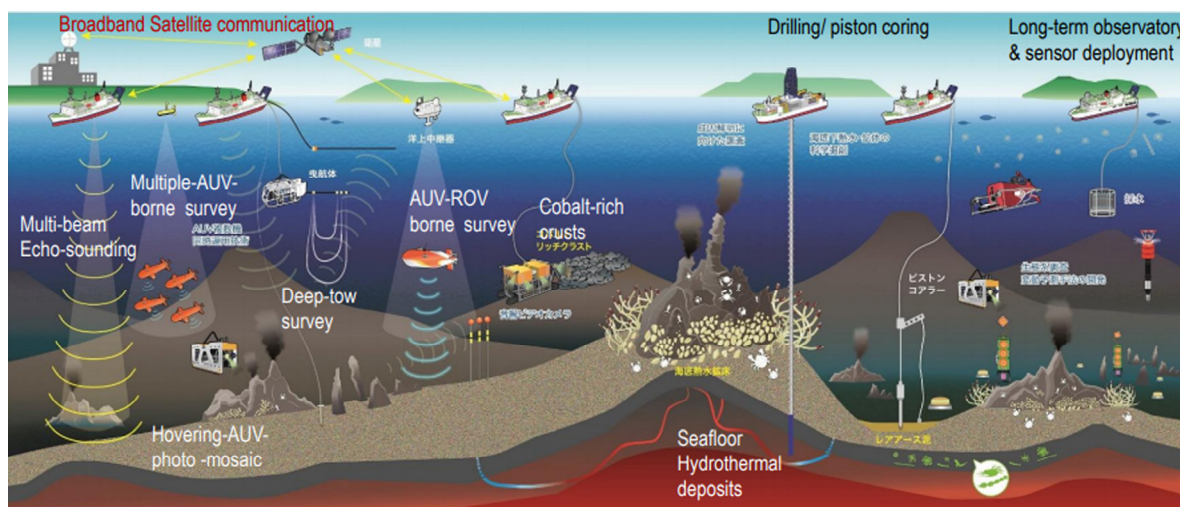


图3 海底多金属硫化物综合勘探概念图(图片来源: <https://www.jamstec.go.jp/sip/en/demonstration/demonstration.html>)

Fig. 3 Concept map of integrated exploration for seabed polymetallic sulphides(Figure from <https://www.jamstec.go.jp/sip/en/demonstration/demonstration.html>)

圈、生物圈和岩石圈串联起来进行物质和能量的交换, 来自洋壳深部的金属元素经热液流体的淋滤通过水岩反应被迁移输送到海底浅表部, 根据围岩的性质、热液流体的温度、pH 和 Eh 等物理化学条件, 发生不同类型的热液成矿作用, 以多金属硫化物、硫酸盐、碳酸盐等形式在上洋壳和海底堆积。海底热液区是微生物的重要栖息地, 热液活动释放出的能量和 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 等气体, 为化能自养型微生物的生长和代谢提供能量和物质来源。微生物在围岩的蚀变、硫化物烟囱体的形成和分解以及热液羽流的扩散沉淀过程中起到了重要作用。即使热液停止活动, 硫氧化菌和铁氧化菌等微生物也能以硫化物为电子供体, 维持生态系统的运行。

微生物活动贯穿于整个海底热液成矿作用和硫化物矿体后期改造的全过程, 并对海洋元素物质循环和海洋生态环境产生影响。如铁氧化菌(FeOB)能够通过氧化环境中二价的铁获取新陈代谢所需的能量, 从而驱动铁氧化物或氢氧化物成矿过程的发生。硫氧化菌能够将还原性硫化物氧化成硫磺或硫酸, 使得金属硫化物中的金属元素发生活化迁移和重组, 促进硫酸盐、氢氧化物或氧化物等次生矿物的形成和局部环境的缺氧和酸化^[81-83]。而不同围岩类型的热液系统和不同的硫化物矿物组合可能对铁硫氧化菌的类群、基因、硫代谢途径、代谢速率和能量来源产生影响^[84]。

随着海底多金属硫化物探矿活动蓬勃发展, 海底热液成矿理论研究得到了较充分的发展, 但是关于微生物在海底热液成矿和演化过程中所起的驱动作用与贡献、途径与机制研究尚十分欠缺^[85]。认识海底热液系统元素在围岩、硫化物矿体和海水之间及微生物细胞内是如何迁移和转化的, 了解硫化物的微生物氧化作用和正常化学氧化作用的效率、途径、机制及生态与环境效应, 揭示微生物的主要类群、基因和硫氧化机制, 对于海底多金属硫化物资源的勘探、评价、选冶开发和环境保护具有重要意义。InterRidge 第三个十年规划(2014~2023)就明确提出微生物对海底硫化物分解起什么作用的科学问题。近年来, 国际海底管理局正在加紧为深海资源的开发及相应的深海环境保护建章立制, 因此

开展海底热液区多圈层地质与微生物耦合研究, 通过海洋地质学、岩石矿物地球化学、微生物学、分子生物学和生物地球化学等领域的多学科交叉研究, 正在成为当下的前沿研究热点。

4.3 资源开发的环境挑战

人类对于硫化物资源的探矿、勘探等活动大力推动了新的热液区、新的热液生物的发现, 促进了对这一特殊生态系统的认识^[86]。但大规模硫化物资源开发活动却对热液区及其毗邻区域的环境构成严峻挑战。近年来, 对活动热液区生态系统环境影响的研究认为, 大规模开采活动可能对生态系统带来重大影响: 1) 栖息地丧失、衰退; 2) 特有物种、稀有种灭绝; 3) 生物多样性降低; 4) 热液流体地球化学成分的改变——这是支撑热液区初级生产的物质基础; 5) 初级生产力降低; 6) 生物间营养关系的改变; 7) 其他未知的可能影响。这些影响可能相互作用, 并且可能存在放大效应^[18, 86]。

从资源规模、环境影响角度考虑, 目前国际上倾向于在非活动热液区进行硫化物开发^[87]。然而, 对非活动热液区硫化物的相关研究并不系统, 甚至对于“非活动”的标准尚无定论^[87-88]。Van DOVER 等^[89]基于现有认识推测了非活动热液区硫化物开采可能会对环境带来的挑战。首先, 开采活动可能会对栖息于非活动硫化物烟囱体内的特有物种造成毁灭性的影响。其次, 开采活动产生的采矿扬尘、回水羽流等会造成生物因食物缺乏和缺氧而死亡^[90]。伴随羽流可能释放的大量重金属有毒物质和引起的 pH 环境改变可能影响更大的范围。再次, 由于海底硫化物“三维”的分布特征致使对其开采将不局限于海底表面, 还包括深部挖掘活动, 这可能会破坏地层中热液循环的通道, 局部改变已有的热液通道格局^[89]。最后, 开采活动还可能进一步引发矿坑内沉积物堆积和水动力环境的削弱, 降低与外界水体的交换, 进一步引发局部的酸化。这会让原有的生境变得不宜生物栖息^[89, 91]。面对上述争议, 我们应加强理论研究, 室内模拟和试验监测, 不断提高人类活动对海底热液系统极端环境影响的科学认知水平, 从而为海底硫化物资源开发等国

际规章制度提供决策建议。

5 结论

大洋多金属硫化物是现代海底一种重要的战略资源,具有广阔的勘探开发前景。通过十五年以来的不懈努力,我国在大洋多金属硫化物资源勘探和研究领域取得了以下两方面的重要进展:

1) 通过多学科综合攻关,我国对全球三大洋多金属硫化物的调查发现、分布规律、形成机理及其热液生态系统等进行了深入研究,获得了多项重要的创新性认识。通过国际合作的方式,极大推动了我国大洋中脊科学研究和知识传播,有效促进了我国大洋硫化物勘探研究的进程并取得重大突破,特别是我国于2011年成为国际上第一个申请“区域”内多金属硫化物勘探合同的国家。

2) 以“三龙”为代表的谱系化近底精细勘查技术和洋中脊深部探测技术为代表的自主研发技术装备实现了从“零”到“一”的重大突破,为大洋多金属硫化物资源预测、调查和评价以及成矿动力学机制研究取得重要发现提供了重要支撑。

当前,《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确指出了深海资源调查和科学研究的重点任务。着眼未来,大洋硫化物勘探研究的前沿应该聚焦近底实时立体勘查技术、多圈层地质-生物耦合成矿理论和硫化物资源开发环境应对等科学技术前沿的重点攻关,为人类不断增进洋中脊地质和环境认知、合理开发利用硫化物资源提供技术和理论支撑。与此同时,对多金属硫化物资源开发活动可能产生的各种环境挑战,我们需要深入开展非活动热液区硫化物及隐伏硫化物矿床找矿的勘探与研究,重点发展智能、重载、协同、绿色勘探开发技术为人类开展深海采矿商业开发做好科学和技术储备。

REFERENCES

[1] CORLISS J B, DYMOND J, GORDON L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos rift[J]. *Science*, 1979, 203(4385): 1073–1083.

[2] RONA P A. Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers[J]. *Earth Science Reviews*, 1984, 20: 1–104.

[3] RONA P A, SCOTT S D. A special issue on seafloor hydrothermal mineralization: New perspectives[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 1935–1975.

[4] SPIESS F N, MACDONALD K C, ATWATER T, et al. Hot springs and geophysical experiments[J]. *Science*, 1980, 207: 1421–1433.

[5] UNFCCC Adoption of the Paris Agreement[Z]. Paris: United Nations, 2015.

[6] VIDAL O, ARNDT N. Metals for a low-carbon society[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(11): 894–896.

[7] STEFAN B, JANEZ P, HEINZ S, et al. Multi-scale governance of sustainable natural resource use—Challenges and opportunities for monitoring and institutional development at the national and global level[J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 1–25.

[8] RONA P A. Resources of the sea floor[J]. *Science*, 2003, 299(5607): 673–674.

[9] CATHLES L M. What processes at mid-ocean ridges tell us about volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(5/6): 639–657.

[10] MONECKE T, PETERSEN S, HANNINGTON M D, et al. The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions[M]. Knoxville, Tenn: Society of Economic Geologists Inc, 2016.

[11] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

ZENG Zhi-gang. Submarine hydrothermal geology[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[12] TAKAI K, NAKAMURA K, TOKI T, et al. Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(31): 10949–10954.

[13] KARSON J A, KELLEY D S, FORNARI D J, et al. Discovering the deep: A photographic atlas of the seafloor and ocean crust[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

[14] WOLFF T. Composition and endemism of the deep-sea hydrothermal vent fauna[J]. *Cahiers De Biologie Marine*,

- 2005, 46(2): 97–104.
- [15] CUVELIER A D, JOZÉE S B, COLAO A A, et al. Distribution and spatial variation of hydrothermal faunal assemblages at Lucky Strike (Mid-Atlantic Ridge) revealed by high-resolution video image analysis-Science Direct[J]. Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers, 2009, 56(11): 2026–2040.
- [16] GLOVER A G, GOODAY A J, BAILEY D M, et al. Temporal change in deep-sea benthic ecosystems: A review of the evidence from recent time-series studies[J]. Advances in Marine Biology, 2010, 58: 1–95.
- [17] MARSH L, COPLEY J T, HUVENNE V, et al. Microdistribution of faunal assemblages at deep-sea hydrothermal vents in the southern ocean[J]. PLoS ONE, 2012, 7(10): e48348.
- [18] VAN DOVER C L. Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: What is at risk?[J]. Ices Journal of Marine Science, 2011, 67(2): 341–348.
- [19] RAMIREZ-LLODRA E, SHANK T M, GERMAN C R. Biodiversity and biogeography of hydrothermal vent species: Thirty years of discovery and investigations[J]. Oceanography, 2007, 20(1): 30–41.
- [20] BACHRATY C, LEGENDRE P, DESBRUYERES D. Biogeographic relationships among deep-sea hydrothermal vent faunas at global scale[J]. Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers, 2009, 56(8): 1371–1378.
- [21] ROGERS A D, TYLER P A, CONNELLY D P, et al. The discovery of new deep-sea hydrothermal vent communities in the southern ocean and implications for biogeography[J]. PLoS Biology, 2012, 10(1): 1–17.
- [22] YANN M, DANIEL D, DUARTE C M, et al. Biogeography revisited with network theory: Retracing the history of hydrothermal vent communities[J]. Systematic Biology, 2012, 61(1): 127–137.
- [23] 李家彪, 王叶剑, 李小虎. 现代海底热液硫化物成矿地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- LI Jia-biao, WANG Ye-jian, LI Xiao-hu. Modern submarine hydrothermal sulfide metallogenic geology[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [24] BEAULIEU S E, SZAFRANSKI K M. InterRidge global database of active submarine hydrothermal vent fields version 3.4[R]. Paris: Institute de Physique du Globe de Paris, 2020.
- [25] JAMIESON J W, HANNINGTON M D, PETERSEN S. Seafloor massive sulfide resources[M]. Hoboken: Wiley & Sons Ltd, 2017: 1–10.
- [26] BAKER E T. Exploring the ocean for hydrothermal venting: New techniques, new discoveries, new insights[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86: 55–69.
- [27] GERMAN C R, PETERSEN S, HANNINGTON M D. Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming?[J]. Chemical Geology, 2016, 420: 114–126.
- [28] ZENG Zhi-gang, MA Yao, YIN Xue-bo, et al. Factors affecting the rare earth element compositions in massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(8): 2679–2693.
- [29] ZENG Zhi-gang, CHEN Dai-geng, YIN Xue-bo, 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.
- [30] 曾志刚, 陈祖兴, 张玉祥, 等. 海底热液活动的环境与产物[J]. 海洋科学, 2020, 44(7): 143–155.
- ZENG Zhi-gang, CHEN Zu-xing, ZHANG Yu-xiang, et al. Seafloor hydrothermal activities and their geological environments and products[J]. Marine Sciences, 2020, 44(7): 143–155.
- [31] ZENG Zhi-gang, CHEN Zu-xing, ZHANG Yu-xiang, et al. Geological, physical, and chemical characteristics of seafloor hydrothermal vent fields[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2020, 38(4): 985–1007.
- [32] ZENG Zhi-gang, QI Hai-yan, CHEN Shuai, 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.
- [33] ZENG Zhi-gang, WANG Xiao-yuan, ZHANG Guo-liang, 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 (Series D: Earth Sciences), 2008, 51(2): 206–215.
- [34] 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 Zhi-gang, ZHANG Wei, RONG Kun-bo, 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.
- [35] 曾志刚. 东太平洋海隆热液地质[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- ZENG Zhi-gang. Hydrothermal geology of the East Pacific Rise[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [36] ZENG Zhi-gang, LI Xiao-hui, CHEN Shuai, et al. Iron, copper, and zinc isotopic fractionation in seafloor basalts and hydrothermal sulfides[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 1–16.
- [37] MENG Xing-wei, LI Xiao-hu, CHU Feng-you, et al. Trace element and sulfur isotope compositions for pyrite across the mineralization zones of a sulfide chimney from the East Pacific Rise (1-2°S)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 116: 103209.
- [38] ZENG Zhi-gang, 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.
- [39] ZENG Zhi-gang, 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.
- [40] ZENG Zhi-gang, 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.
- [41] SUN Zhi-lei, ZHOU Huai-yang, YANG Qun-hui, et al. Hydrothermal Fe-Si-Mn oxide deposits from the Central and South ValuFa Ridge, Lau Basin[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(7): 1192–1204.
- [42] ZHOU Hong-bo, JI Hou-guo, WEI Man-man, et al. Ecology detection of moderate thermophilic enrichment at Lau Basin hydrothermal vents[J]. *Journal of Central South University*, 2011, 18(2): 392–398.
- [43] LI Jiang-tao, ZHOU Huai-yang, PENG Xiao-tong, et al. Microbial diversity and biomineralization in low-temperature hydrothermal iron-silica-rich precipitates of the Lau Basin hydrothermal field[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 81(1): 205–216.
- [44] SUN Zhi-lei, ZHOU Huai-yang, GLASBY G P, et al. Formation of Fe-Mn-Si oxide and nontronite deposits in hydrothermal fields on the ValuFa Ridge, Lau Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 43(1): 64–76.
- [45] LI Zheng-gang, CHU Feng-you, DONG Yan-hui, et al. Origin of selective enrichment of Cu and Au in sulfide deposits formed at immature back-arc ridges: Examples from the Lau and Manus basins[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 74: 52–62.
- [46] TAO Chui-hui, SEYFRIED W E, LOWELL R P, et al. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1–9.
- [47] LIAO Shi-li, TAO Chun-hui, LI Huai-ming, et al. Bulk geochemistry, sulfur isotope characteristics of the Yuhuang-1 hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 96: 13–27.
- [48] YUE Xi-he, LI Huai-ming, REN Jian-ye, et al. Seafloor hydrothermal activity along mid-ocean ridge with strong melt supply: Study from segment 27, southwest Indian ridge[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1–10.
- [49] LIAO Shi-li, TAO Chun-hui, ZHU Chuan-wei, et al. Two episodes of sulfide mineralization at the Yuhuang-1 hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge: Insight from Zn isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2019, 507: 54–63.
- [50] TAO Chun-hui, WU Guang-hai, DENG Xian-ming, et al. New discovery of seafloor hydrothermal activity on the Indian Ocean Carlsberg Ridge and Southern North Atlantic Ridge-progress during the 26th Chinese COMRA cruise[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(8): 85–88.
- [51] CHEN Yang, HAN Xi-qiu, WANG Ye-jian, et al. Precipitation of calcite veins in serpentinized harzburgite at Tianxiu hydrothermal field on Carlsberg Ridge(3.67°N), Northwest Indian Ocean: Implications for fluid circulation[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(1): 91–101.
- [52] ZONG Tong, HAN Xi-qiu, LIU Ji-qiang, et al. H₂O in basaltic glasses from the slow-spreading Carlsberg Ridge: Implications for mantle source and magmatic processes[J]. *Lithos*, 2019, 332/333: 274–286.
- [53] WANG Ye-jian, HAN Xi-qiu, ZHOU Ya-dong, et al. The Daxi Vent Field: An active mafic-hosted hydrothermal system at a non-transform offset on the slow-spreading

- Carlsberg Ridge, 6°48'N[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 129: 103888.
- [54] WANG Ye-jian, HAN Xi-qiu, PETERSEN S, et al. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 1–19.
- [55] LI Bing, SHI Xue-fa, WANG Ji-xin, et al. Tectonic environments and local geologic controls of potential hydrothermal fields along the Southern Mid-Atlantic Ridge (12–14°S)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 181: 1–13.
- [56] 唐 鑫, 杨耀民, 王国芝, 等. 南大西洋 15°S 热液区玄武岩中熔融包裹体组成及意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(3): 362–371.
- TANG Xin, YANG Yao-min, WANG Guo-zhi, et al. The significances and compositions of melt inclusions in the basalt from South Atlantic 15°S hydrothermal field[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2016, 43(3): 362–371.
- [57] TAO Chun-hui, CHEN Sheng, BAKER E T, et al. 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[J]. *Marine Geophysical Research*, 2017, 38(1/2): 3–16.
- [58] TAO Chun-hui, LI Huai-ming, YANG Yao-min, et al. Two hydrothermal fields found on the Southern Mid-Atlantic Ridge[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1302–1303.
- [59] FAN Lei, WANG Guo-zhi, HOLZHEID A, et al. Sulfur and copper isotopic composition of seafloor massive sulfides and fluid evolution in the 26°S hydrothermal field, Southern Mid-Atlantic Ridge[J]. *Marine Geology*, 2021, 435: 106436.
- [60] TAO Chun-hui, LI Huai-ming, JIN Xiao-bing, et al. Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the Southwest Indian Ridge[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(19): 2266–2276.
- [61] 陶春辉, 陈建平, 廖时理, 等. 洋中脊多金属硫化物成矿预测与资源量估算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- TAO Chun-hui, CHEN Jian-ping, LIAO Shi-li, et al. Metallogenic prediction and resource estimation of polymetallic sulfide in mid ocean ridge[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [62] 陶春辉, 梁 锦, 王汉闯, 等. 洋中脊多金属硫化物勘查方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- TAO Chun-hui, LIANG Jin, WANG Han-chuang, et al. Exploration methods and techniques of polymetallic sulphides in the mid ocean ridge[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [63] LIU Lu-shi, LU Ji-long, TAO Chun-hui, et al. GIS-based mineral prospectivity mapping of seafloor massive sulfide on ultraslow-spreading ridges: A case study of Southwest Indian Ridge 48.7°–50.5° E[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30: 971–987.
- [64] LI Jia-biao, JIAN Han-chao, CHEN Yong-shun, et al. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2656–2663.
- [65] ZHAO Ming-hui, QIU Xue-lin, LI Jia-biao, et al. Three-dimensional seismic structure of the Dragon Flag oceanic core complex at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (49 degrees 39'E)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(10): 4544–4563.
- [66] TAO Chun-hui, LIN Jian, GUO Shi-qin, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2012, 40(1): 47–50.
- [67] 吴 涛. 西南印度洋脊热液硫化物区近底磁法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WU Tao. Near-bottom magnetic study of hydrothermal fields on the Southwest Indian Ridge[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [68] ZHU Z, TAO C, SHEN J, et al. Self-potential tomography of a deep-sea polymetallic sulfide deposit on Southwest Indian Ridge[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JB019738>.
- [69] PETERSEN S, HANNINGTON M, KRTSCHELL A. Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources[J]. *Responsabilite & Environnement*, 2017, 85(1): 14–18.
- [70] GILL A, VARDY M, MINSHULL T, et al. How to identify extinct seafloor massive sulphides by using OBS wide-angle data—A case study from the Blue Mining project in the TAG hydrothermal field[C]//*Proceedings of the 46th. Underwater Mining Conference*, Berlin: GEOMAR, 2017: 24–26.
- [71] JEGEN M, HÖLZ S, SAFIPOUR R, et al. Exploration of Buried SMS Deposits with Time Domain EM[C]//*Near*

- Surface Geoscience 2016—Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference. Barcelona, Spain: European Association of Geoscientist & Engineers, 2016: 1–5.
- [72] YU Zhi-teng, LI Jia-biao, NIU Xiong-wei, et al. Lithospheric structure and tectonic processes constrained by microearthquake activity at the central ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge (49.2° to 50.8° E)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123: 6247–6262.
- [73] JIAN Han-chao, SINGH S C, CHEN Yong-shun, et al. Evidence of an axial magma chamber beneath the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2017, 45(2): 143–146.
- [74] HYAKUDOME T, MATSUMOTO H, NAKANO Y, et al. Development of ASV for using multiple AUVs operation[C]//Proceedings in OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston, SC, USA: IEEE, 2018: 1–4.
- [75] MCDUFF R E. Physical dynamics of deep-sea hydrothermal plumes[C]//HUMPHRIS R Z S, MULLINEAUX L, THOMSON R. Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions, in *Geophysical Monograph*. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1995: 357–368.
- [76] COOGAN L A, ATTAR A, MIHALY S F, et al. Near-vent chemical processes in a hydrothermal plume: Insights from an integrated study of the Endeavour segment[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(4): 1641–1660.
- [77] KOSCHINSKY A, SCHMIDT K, GARBE-SCHÖNBERG D. Geochemical time series of hydrothermal fluids from the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge: Implications of medium-term stability[J]. *Chemical Geology*, 2020, 552(119760): 1–17.
- [78] CRONE T J, WILCOCK W, MCDUFF R E. Flow rate perturbations in a black smoker hydrothermal vent in response to a mid-ocean ridge earthquake swarm[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010, 11(3): 1–13.
- [79] LILLEY M D, BUTTERFIELD D A, LUPTON J E, et al. Magmatic events can produce rapid changes in hydrothermal vent chemistry[J]. *Nature*, 2003, 422(6934): 878–881.
- [80] DAVIS E E, WANG K, THOMSON R E, et al. An episode of seafloor spreading and associated plate deformation inferred from crustal fluid pressure transients[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2001, 106(B10): 21953–21963.
- [81] EDWARDS K J, BACH W, MCCOLLOM T M, et al. Neutrophilic iron-oxidizing bacteria in the ocean: Their habitats, diversity, and roles in mineral deposition, rock alteration, and biomass production in the deep-sea[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2004, 21(6): 393–404.
- [82] KENNEDY C B, SCOTT S D, FERRIS F G. Ultrastructure and potential sub-seafloor evidence of bacteriogenic iron oxides from Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, north-east Pacific Ocean[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 43(2): 247–254.
- [83] EDWARDS K J, BACH W, ROGERS D R. Geomicrobiology of the ocean crust: A role for chemoautotrophic Fe-bacteria[J]. *Biological Bulletin*, 2003, 204(2): 180–185.
- [84] MCCOLLOM T M. Geochemical constraints on sources of metabolic energy for chemolithoautotrophy in ultramafic-hosted deep-sea hydrothermal systems[J]. *Astrobiology*, 2007, 7(6): 933–950.
- [85] FALLON E K, PETERSEN S, BROOKER R A, et al. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: An assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 309–337.
- [86] VAN DOVER C L. The biological environment of polymetallicsulphides deposits, the potential impact of exploration and mining on this environment, and data required to establish environmental baselines in exploration areas[R]. Durham, USA: Duke University, 2007.
- [87] JAMIESON J W, GARTMAN A. Defining active, inactive, and extinct seafloor massive sulfide deposits[J]. *Marine Policy*, 2020, 117: 103926.
- [88] Van DOVER C L. Inactive sulfide ecosystems in the deep sea: A review[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 1–19.
- [89] VAN DOVER C L, COLAO A, COLLINS P C, et al. Research is needed to inform environmental management of hydrothermally inactive and extinct polymetallic sulfide (PMS) deposits[J]. *Marine Policy*, 2020, 121: 104183.
- [90] BOROWSKI C. Physically disturbed deep-sea macrofauna in the Peru Basin, southeast Pacific, revisited 7 years after the experimental impact[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17/18): 3809–3839.
- [91] BILENKER L D, ROMANO G Y, MCKIBBEN M A.

Kinetics of sulfide mineral oxidation in seawater:
Implications for acid generation during in situ mining of

seafloor hydrothermal vent deposits[J]. Applied
Geochemistry, 2016, 75: 20–31.

Development and prospect of exploration and research on seafloor polymetallic sulfides of China

LIU Ying^{1,2}, LI Jia-biao³, WANG Ye-jian³, TAO Chun-hui³, ZENG Zhi-gang⁴, HAN Xi-qiu³,
LI Chuan-shun⁵, ZHOU Ya-dong³, LIANG Jin³

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. China Ocean Mineral Resources and Development Association, Beijing 100860, China;

3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

5. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: The discovery of seafloor hydrothermal systems has given rise to new fields of global ocean polymetallic sulfides mineralization, benthic extreme ecosystems and multi-spheric interactions at seafloor. This paper focuses on the global discovery of seafloor polymetallic sulfides exploration and research, the development history and technological innovation of China, and the research hotspots of future exploration and development. China should continue to develop the theoretical research on the exploration and development of seafloor polymetallic sulfides, as well as make a breakthrough in the technologies of intelligence, heavy-duty, synergistic and green exploration and development, in order to meet the coming era of commercial exploitation in the near future.

Key words: ocean; polymetallic sulfide; seafloor extreme ecosystem; hydrothermal system; exploration technology

Foundation item: Project(DY135-G2-1) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association

Received date: 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-08-31

Corresponding author: LI Jia-biao; Tel: +86-571-81963306; E-mail: jbli@sio.org.cn

(编辑 李艳红)