

海底热液地质学

曾志刚 编著



科学出版社

海底热液地质学

曹志刚 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

30 多年来,国际上已对海底热液活动的特征及其形成演化过程有了一定程度的认识,中国围绕海底热液硫化物也开展了多方面的调查与研究工作。基于此,本书率先提出了海底热液地质学的构架,将海底热液活动及其产物的分布划分为域、带、亚带、区和点五级,给出了海底热液活动及其多金属硫化物资源的调查模式和探测方法,并划分了海底热液产物的类型,是一本多角度介绍海底热液活动的专著。

本书分别对海底热液活动的分布与环境,热液柱、喷口流体、热液硫化物等热液产物,热液区中的生命现象,热液活动对沉积环境的影响,流体-岩石相互作用,热液活动的深部过程,热液系统的热-质通量问题以及热液系统的资源潜力作了介绍。

本书可供从事海底热液地质、海洋地球化学、海底矿产资源、热液生物学和热液生态学等学科的研究人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海底热液地质学/曾志刚编著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-029970-3

I. ①海… II. ①曾… III. ①海底矿床:热液矿床-地质学 IV. ①P736.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 005196 号

责任编辑:张 震 马云川 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:张雪颖,鑫联必升

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天时彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 2 月第一次印刷 印张:36 1/4 插页:2

印数:1—1 500 字数:860 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

海底热液活动是国际上海洋科学关注的前沿领域,是综合大洋钻探计划(integrated ocean drilling program, IODP)等众多海洋大型计划的重要研究内容。海底热液活动研究正在逐渐改变着人们对海底世界的传统认识,有助于深刻认识海洋中岩石圈、水圈和生物圈的三圈结构、物质组成及其内在联系,是国际上有望取得新突破的研究方向之一。

从 20 世纪 90 年代开始,曾志刚同志就开展了海底热液活动调查研究工作。他及其课题组先后开展了冲绳海槽 Jade 热液区、大西洋 TAG 热液区、龟山岛热液区、东太平洋海隆 13°N 附近、中印度洋脊 Edmond 和 Kairei 热液区、西南印度洋脊、Manus 海盆和北斐济海盆等地的热液活动研究,进一步揭示了大西洋 TAG 热液区热液硫化物中流体包裹体的稀有气体来源,初步确定了冲绳海槽 Jade 热液区中硫化物形成的年代范围,探讨了冲绳海槽 Jade 热液区和东太平洋海隆 13°N 附近硫化物中稀有和分散元素的变化特征及其控制因素,明确了热液柱对东太平洋海隆 13°N 附近 Fe-氧羟化物形成的物质贡献,并与台湾地区学者合作研究了龟山岛热液区的热液活动,提出了龟山岛热液区自然硫烟卤体的形成模式,初步进行了冲绳海槽和东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩以及马里亚纳弧前橄榄岩的岩石学和地球化学研究,对海底岩浆活动以及岩浆期后作用有了一定认识。在 2003 年该课题组还承担了我国大洋协会组织的在东太平洋海隆进行的热液硫化物调查工作的航段首席任务,该航段是我国独立地运用自主技术和国产调查设备首次在东太平洋海隆获得了海底热液硫化物等一批样品和数据资料,使调查研究工作迈出了可喜的一步。2005 年承担了中国大洋矿产资源研究开发协会组织的环球航次东太平洋海隆、大西洋和印度洋三个硫化物调查航段的部分重要工作。最近,该课题组正在开展有关海底热液硫化物调查评价的规范标准方面的研究工作。

在以上工作的基础上,他参考国内外的有关文献,编写了这本专著。书中提出了一些新的研究思路和新的学术观点,都可供参考。

作为青年一代的科学工作者,曾志刚同志热爱他所从事的工作、学风正派、学术思想活跃、工作刻苦努力,即便在十分困难的情况下仍能坚持所热爱的研究方向,无论是海上调查还是室内分析,都能亲自动手去做,是一位“能文能武”的科研人员。我祝贺他们取得的阶段性成果,并相信他一定会在海底热液活动研究中取得更多的成绩。

秦蕴珊

2010 年 11 月 15 日

前 言

自 1977 年人类使用载人潜器观测到海底热液活动现象以来,对海底热液活动的研究已有 30 多年的历史。海底热液活动所具有的独特自然现象——烟囱体的形成、流体的喷发、热液柱的扩散以及多种多样的生物活动等,使热液活动研究一直是当代海洋科学研究的重要前沿领域之一。对海底热液硫化物资源潜力的评价,对热液环境生物基因资源的开发、利用,以及促进对极端生态环境的有效保护等重要工作,已成为海底热液活动研究的长期、核心任务。目前,已了解现代海底热液活动多分布在洋中脊、岛弧、弧后盆地等构造环境中,热液硫化物富含 Cu、Zn、Au 和 Ag 等有用元素,热液活动区中存在一个复杂的生态系统,其生物基因资源蕴涵巨大的经济价值,浅水和深水热液活动有着明显的差异和相似之处,等等,而这一切仅仅是对海底热液活动认识的一个开始。

我们还没有全面掌握全球范围内海底热液活动的分布规律(如不清楚中国南海现在是否有热液活动),不清楚海底热液活动的深部过程及热液循环的状况和机制,尚未揭示出海底热液活动与生命起源的关系以及相关的物理、化学、生物和地质过程的内在联系,也未全面掌握海底热液活动对海水环境甚至大气环境的影响情况,不了解海底热液活动与多金属结核、富 Co 结壳、海底石油、天然气水合物等资源的成因联系,更未找到现代海底热液硫化物堆积与陆上古代块状硫化物矿床进行对比的桥梁,进行海底热液活动研究依然缺少大量现场、立体、长期和连续的观测调查和室内模拟(数值和实验)工作作支撑。

为此,极有必要对以往的工作作较全面的总结和回顾,尽可能从多角度介绍海底热液活动研究的主要内容,进而对海底热液活动的基本概念、调查模式以及产物的分类等有较清楚的认识,一为海底热液活动的深入研究提供基础,二为关注和有兴趣从事此项研究的同仁提供一个参考。

同时,应海底热液活动调查研究的需要,考虑到海底热液活动的复杂性和系统性,本书提出了海底热液地质学的构架,通过致力于发展海底热液地质学,使海底热液活动研究更加系统,将热液活动与岩浆作用、生物活动、构造活动、海水响应、沉积记录以及成矿作用有机结合,有助于把握海底热液活动的本质,实现海底热液活动基础理论研究的新突破。

本书共分 11 章。第一章介绍了海底热液地质学的构架,海底热液活动研究的基本概念,海底热液活动的调查模式、探测标志及勘查技术,海底热液活动调查研究简史及状况,以及海底热液活动调查研究存在的问题及发展趋势;第二章将全球热液活动的分布划分为域、带、亚带、区和点五级,分别介绍了太平洋热液活动域、大西洋热液活动域、印度洋热液活动域、北冰洋热液活动带、南极洲热液活动带、红海热液活动带和地中海热液活动带中热液活动的分布与环境情况;第三章介绍了热液柱的类型、结构及空间展布,热液柱的运动特征、物理特征、水体化学特征以及热液柱中颗粒物特征,影响热液柱分布、扩散及其

化学组成的因素,热液柱的形成演化;第四章介绍了喷口流体的类型、温度特征、pH、碱度和化学组成,相分离对喷口流体的影响,流体-超基性岩石相互作用对喷口流体的影响,以及喷口流体的形成演化;第五章介绍了热液产物的产出形态、大小和规模及其控制因素,热液产物的矿物组成、结构构造与物理性质,热液产物的分类、化学组成、形成年代、成因认识与后期变化;第六章介绍了热液喷口生物群落组成及特征,热液喷口生物群落分布及迁移,热液喷口生物群落与喷口环境的关系,热液活动区中生物的共生现象,热液喷口生物群落的营养结构与食物链,热液区中的生物作用,热液区的生命起源问题,以及热液活动与深部生物圈;第七章介绍了热液柱颗粒物沉降对沉积物的影响和热液-沉积物相互作用;第八章介绍了流体-超基性岩石相互作用,流体-基性岩相互作用和流体-中、酸性岩石相互作用;第九章介绍了热液系统的深部结构和热液循环,以及海底下的海洋及流体流动问题;第十章介绍了热液系统的热、质通量问题;第十一章介绍了热液硫化物和热液区生命活动的资源潜力。需要特别说明的是,由于有关热液柱形成演化讨论、喷口流体形成演化讨论、热液产物的物理性质、生命起源探讨、热液活动与深部生物圈、热液-沉积物相互作用、热液系统的热质通量以及热液区生命活动的资源潜力等方面的研究,相对比较薄弱,书中各节仅对其做了非常简略的介绍,相信随着国内外对上述工作的不断深入推进,其内容及成果也必将得到不断丰富和完善。

本书的有关资料收集、数据整理和图表绘制等工作,是在王晓媛、殷学博、刘长华、张国良、汪小妹、陈帅、武力、黄鑫、周杰、孔凡翠、欧阳荷根、陈俊兵、余少雄、袁春伟、陈代庚和李康的共同努力下完成的。他们的部分学位论文和研究成果以及与本人共同发表的研究论文是本书写作的重要基础之一。全书在课题组成员共同协作的基础上,由本人执笔完成。

本书的研究,先后得到了国家自然科学基金重点项目(东太平洋海隆 13°N 附近热液产物的化学组成变化及其控制因素研究;编号:40830849;起止年月:2009.01~2012.12),山东省自然科学基金项目(中印度洋洋脊 Edmond 热液区中热液产物的元素富集及其形成条件研究;编号:JQ200913;起止年月:2009.11~2012.12),国家高技术研究发展计划(863 计划)课题[海底热液柱 TMT(Temperature, Methane, turbidity)探测系统研制;编号:2008AA09Z205;起止年月:2008.08~2010.12],国家自然科学基金面上项目(北斐济海盆热液烟囱的元素地球化学研究;编号:40976027;起止年月:2010.01~2012.12),中国科学院知识创新工程重要方向项目(太平洋典型区域海底热液活动的环境效应研究;编号:KZCX3-SW-223;起止年月:2005.01~2007.12),国家自然科学基金面上项目(冲绳海槽热液硫化物的年代学研究;编号:40176020;起止年月:2002.01~2004.12),国家 863 计划项目青年基金课题(海底热液活动简易示踪设备研制;编号:2001AA616070;起止年月:2002.05~2004.05)和国家自然科学基金面上项目(名称:台湾东北部龟山岛浅海烟囱体的形成机制研究;编号:40376020;起止年月:2004.01~2006.12)的资助,特此对国家自然科学基金委员会、山东省自然科学基金委员会、中华人民共和国科学与技术部和中国科学院表示衷心的感谢。

特别感谢中国科学院海洋研究所陈丽蓉先生细致审阅全书,并为本书提出了宝贵的建设性意见。本书书名的获得也得益于陈丽蓉先生的智慧和启发。同时感谢参加 2003

年 DY105-12、14 航次东太平洋海隆硫化物调查航段,2005~2006 年 DY105-17 航次东太平洋海隆航段、大西洋航段、印度洋航段和随后 DY115-20 航次东太平洋海隆航段的所有“大洋一号”船、队员以及中国大洋矿产资源研究开发协会对我们开展海底热液活动调查研究给予的大力支持。特别强调的是,作为后学者,我们的工作得益于国内外诸多先生的先驱性研究及成就,在此对他们表示崇高的敬意。

由于笔者水平及时间有限,不足之处在所难免,敬希读者批评指正。

曾志刚

2010 年 9 月 25 日于汇泉湾畔

目 录

序

前言

第一章 海底热液地质学概论·····	1
第一节 海底热液地质学的构架·····	1
第二节 海底热液活动研究的基本概念·····	6
第三节 海底热液活动的调查模式、探测标志及勘查技术 ·····	8
第四节 海底热液活动调查研究简史及状况分析 ·····	12
第五节 海底热液活动调查研究存在的问题及发展趋势 ·····	24
参考文献 ·····	27
第二章 海底热液活动的分布与环境 ·····	35
第一节 太平洋热液活动域 ·····	40
第二节 大西洋热液活动域·····	106
第三节 印度洋热液活动域·····	134
第四节 北冰洋热液活动带·····	144
第五节 南极洲热液活动带·····	149
第六节 红海热液活动带·····	150
第七节 地中海热液活动带·····	154
参考文献·····	157
第三章 热液柱·····	183
第一节 热液柱的类型、结构及空间展布 ·····	183
第二节 热液柱的运动和物理特征·····	186
第三节 热液柱水体化学特征·····	196
第四节 热液柱中颗粒物特征·····	212
第五节 影响热液柱分布、扩散的因素 ·····	231
第六节 影响热液柱化学组成的因素·····	233
第七节 热液柱的形成演化讨论·····	235
参考文献·····	237
第四章 喷口流体·····	245
第一节 喷口流体的类型·····	245
第二节 喷口流体的温度特征·····	246
第三节 喷口流体的 pH 和碱度·····	257
第四节 喷口流体的化学组成·····	260

第五节	相分离对喷口流体的影响·····	329
第六节	流体-超基性岩石相互作用对喷口流体的影响·····	334
第七节	喷口流体的形成演化讨论·····	335
参考文献	·····	343
第五章	热液产物 ·····	352
第一节	热液产物的产出形态、大小和规模及其控制因素·····	352
第二节	热液产物的矿物组成、结构构造与物理性质·····	357
第三节	热液产物的分类·····	366
第四节	热液产物的化学组成·····	368
第五节	热液产物的形成年代·····	402
第六节	热液产物的成因认识与后期变化·····	405
参考文献	·····	426
第六章	热液区中的生命现象 ·····	436
第一节	热液喷口生物群落组成及特征·····	436
第二节	热液喷口生物群落分布及迁移·····	438
第三节	热液喷口生物群落与喷口环境的关系·····	450
第四节	热液活动区中生物的共生现象、营养结构与食物链·····	453
第五节	热液区中的生物作用·····	455
第六节	热液区的生命起源探讨·····	459
第七节	热液活动与深部生物圈·····	460
参考文献	·····	461
第七章	热液活动对沉积环境的影响 ·····	474
第一节	热液柱颗粒物沉降的影响·····	474
第二节	热液-沉积物相互作用·····	486
参考文献	·····	488
第八章	流体-岩石相互作用 ·····	492
第一节	流体-超基性岩相互作用·····	492
第二节	流体-基性岩相互作用·····	501
第三节	流体-中、酸性岩石相互作用·····	511
参考文献	·····	515
第九章	热液活动的深部过程 ·····	523
第一节	热液系统的深部结构·····	523
第二节	热液循环·····	529
参考文献	·····	534
第十章	热液系统的热、质通量问题 ·····	537
第一节	热通量·····	537
第二节	质通量·····	544

参考文献	546
第十一章 热液系统的资源潜力	550
第一节 热液硫化物的资源潜力	550
第二节 热液区生命活动的资源潜力	565
参考文献	566

第一章 海底热液地质学概论

海底热液活动的范围涉及水圈、岩石圈和生物圈,它是连接水圈、岩石圈和生物圈的桥梁之一(图 1-1)。海底热液活动的形成需要三个基本条件:流体,通道和热源。了解海底热液活动这一自然现象,需要在强有力的技术支撑下,开展海洋地质学、海洋生物学、海洋化学和物理海洋学等多学科综合性的调查研究。正是应现代海底热液活动调查研究对多学科的综合需求,诞生了海底热液地质学(submarine hydrothermal geology)。

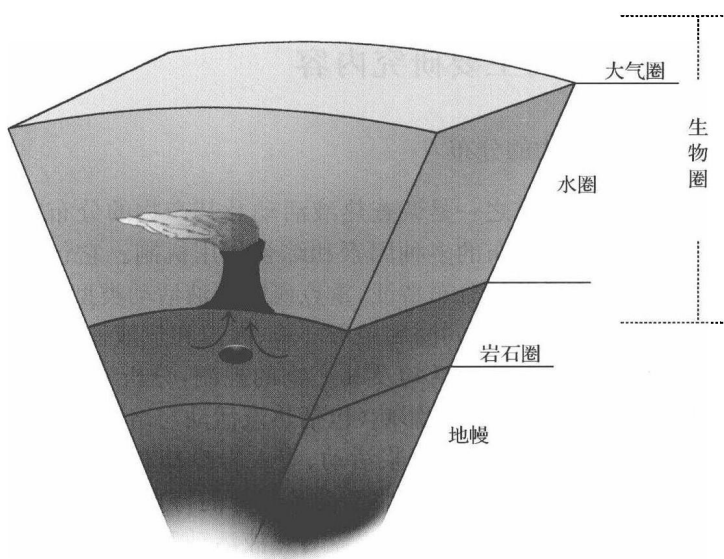


图 1-1 连接水圈、岩石圈和生物圈的海底热液活动

本章将分节介绍海底热液地质学的构架,海底热液活动研究的基本概念,海底热液活动的调查模式、探测标志及勘查技术,海底热液活动调查研究简史及状况分析,以及海底热液活动调查研究存在的问题及发展趋势。

第一节 海底热液地质学的构架

海底热液地质学是一门揭示海底热液活动及其产物的分布、特征、形成、演化及其资源潜力的学科,其中也包括相关技术的研发工作。通过开展海底热液活动与成矿、生物活动、深部过程和其他深海资源的关系等多方面的研究,旨在解决海底热液活动的形成演化、生命响应、成矿规律及其对环境的影响情况等关键基础理论问题,认识海底热液活动与生命起源的关系,了解海底热液系统在地球系统中过去、现在和未来的作用与角色,揭

示海底热液活动这一自然现象的本质;同时,不断促进用于海底热液活动调查研究的高新技术发展。

一、海底热液地质学的研究对象和基本任务

海底热液地质学的研究对象包括两大部分:①热液活动及其产物;②热液活动及其产物所涉及的环境(这里所指的环境包括热液活动及其产物所处的海水环境、沉积和岩石环境、岩浆环境、断裂环境等)。

基本任务主要体现在三个方面:①了解热液活动及其产物的分布、特征、形成机制和演化规律;②认识热液活动及其产物的资源潜力及与其他资源的关系;③揭示热液活动在过去、现在和未来地球系统中的作用和角色。

二、海底热液地质学的主要研究内容

1. 海底热液活动及其产物的分布

海底热液地质学的主要工作之一是调查热液活动及其产物的分布特征,研究控制其分布的条件、过程,了解制约其分布的多种因素和综合作用机制。它包括分析弧后盆地、岛弧和洋中脊等环境中热液活动的分布特征,重点研究热液活动类型与水深的对应关系,底流与热液活动的关系(包括了解不同海底地形环境、海流和热液柱运动三者之间的关系等),研究不同地壳结构及性质对热液活动及其产物的控制,分析岩浆的组分、侵入深度、岩浆房的几何形状及规模对热液活动的影响(包括热液活动与熔融区形态、大小及地壳结构的关系),了解热液活动的热源(包括岩浆活动、侵入岩冷却和流体-岩石相互作用供热等),对比从超快速到超慢速扩张洋中脊岩浆活动及热源的特点,分析热液活动、热点和洋壳运动三者的耦合关系,岩石基底和沉积物覆盖对热液活动及其产物的控制作用,沉积物对热液活动的记录以及海底岩石的热液蚀变过程。在此基础上,海底热液地质学将解决热液活动与水深、底流、潮汐、底质性质、岩浆活动、构造运动及断裂系统、地震活动等的关系问题。海底热液地质学可为新海底热液区(包括活动和非活动热液区)的寻找提供理论指导,有助于促进对岩石圈形成和演化的深入认识。

2. 海底热液活动及其产物的特征、形成机制和演化过程

海底热液地质学研究热液产物的物质组成、物理和化学特征,探讨其形成条件和形成过程,对比分析不同环境中热液活动及其产物的演化特点(包括洋中脊和弧后盆地,超快速和超慢速扩张洋中脊等环境的热液活动及其产物的对比),深入认识海底热液活动及其产物的演化规律。这方面的工作,还包括:①展开热液柱、喷口流体、热液硫化物等多方面的研究,分析热液活动及其产物形成的物质来源和时代(包括热液活动的强度、频率及演化历史);②揭示热液产物特殊结构的成因(如自然硫烟囱体),侧重研究岩浆活动、岩石、沉积物和海水对热液产物形成的物质贡献;③分析热液产物形成过程中流体的特征及其

变化过程,探讨热液柱物理化学变化的机制,海水与热液物质的交换及海水环境中热液物质的迁移过程及形式,热液产物中 Cu、Zn、Au、Ag 等有用元素的富集机制;④研究热液产物形成过程中生物作用的条件和过程;⑤探讨热液-海水混合与热液产物组构变化的关系,区分热液产物经历生物和非生物作用过程的指标体系;⑥了解热液-海水混合过程中的物理化学变化,揭示海底热液活动对水体和底质环境的影响情况;⑦明确生物活动在海底热液产物形成过程中的作用和地位,促进对地球系统物质循环的深入认识。同时,海底热液地质学研究为极端环境下的生命科学及生物基因特性研究提供支撑。

3. 海底热液活动的热、质通量及深部过程

海底热液地质学研究热液活动与环境相互作用过程中的热、质迁移和交换过程,监测、分析海底热液系统各单元物理、化学、生物过程中的热、质迁移和交换过程,揭示构造运动(如断裂)对热液循环及其成矿作用的影响,了解海底下热液流体循环及下渗的深度,驱动热液循环的机制,了解热液活动过程中的热、质通量及其控制因素,研究热液循环的空间结构及产物分布,揭示热液活动对海水物理化学性质的影响情况。海底热液地质学研究有助于深入认识热液活动的深部过程,热液活动与全球变化的关系,为正确评价海底热液产物的资源潜力提供研究基础。

4. 海底热液区中的生命现象

海底热液地质学研究热液区中生物的地质特征。其中包括:①了解热液区生物的产状、生存环境及其特殊组织和产物;②分析不同热液环境生物多样性的特点及不同类型热液产物中微生物的性状及分布;③研究热液区生物群落演变与热液活动的关系,了解热液活动对生物多样性的制约机制;④探讨生物体与热液区环境中热液产物、岩石和沉积物相互作用过程中,生物体中无机物与有机物之间的转换条件和过程及化学元素的作用条件和作用过程;⑤揭示微生物成矿的机制及热液产物对生物活动的记录,建立生物示踪热液活动及其硫化物等产物的指标,深入理解热液活动与生命现象的关系,侧重了解热液区生物对海底热液环境变化的响应及其对其他热液产物的作用。

5. 古、今海底热液活动及其成矿作用对比

海底热液地质学研究建立现代与陆上类似古代海底热液硫化物的对比途径及方法,构建古、今海底热液活动及其成矿作用对比的理论桥梁,从成矿环境、成矿特征和成矿机制等方面开展海底热液成矿对比研究。它包括分析洋中脊扩张速率、热液循环与热液成矿特征的关系,探讨洋中脊、岛弧与弧后盆地热液成矿在流体演变方面的差别及内在联系,探讨热液成矿的分布、产状和规模及其物质来源等条件和过程,了解热液成矿的演变特征及其控制因素,提高评价和预测海底热液成矿的水平。海底热液地质学侧重研究岩浆作用对洋中脊轴部和离轴环境热液成矿作用的控制、热液活动的成矿规律,完善现代海底热液成矿模式,建立以硫化物为主轴的海底多元成矿系统理论,综合评价海底热液产物的资源潜力。海底热液地质学研究可为海底多金属硫化物调查靶区和远景区的圈定提供研究基础,为陆上古代海底热液硫化物矿床的深入研究提供参考,不断提升对海底固体矿

产资源的认识程度。

6. 海底热液活动实验和数值模拟研究

与上述研究紧密结合,海底热液地质学将重点开展以下模拟研究:①热液和海水环境之间的热、质交换与平衡过程;②岩浆上侵和冷却过程分别对热液活动的影响;③热液流体、沉积物、岩石及矿物和生物之间的相互作用;④深部流体运移通道的形成与变化;⑤生物活动对金属元素的富集机制。同时,海底热液活动实验和数值模拟研究侧重了解海底断裂对热液活动的控制作用,海水转变为热液流体的条件及深部环境特点。它了解海底热液活动及其成矿的环境、特征和机制提供实验支撑及技术,有助于掌握海底热液活动及其成矿的条件和过程参数。这有助于量化热液活动对海水、沉积、岩石及生物环境的影响情况,促进对海底热液活动及其成矿作用的深入认识。

7. 用于海底热液活动调查研究的关键技术研发

技术研发是海底热液地质学的有机组成部分,海底热液地质学的发展离不开技术的支撑。技术和研究两条腿走路,技术研发永远为未来研究提供技术、设备支撑,目前研究不断对技术发展提出超前需求。因此,海底热液活动调查研究必须与技术的研发工作紧密结合,起到相互促进、共同发展的作用。通过海底热液活动的海上调查、连续监测和室内模拟,从多角度提出技术需求,研究有效解决关键技术问题的基本思路和方法,使海底热液地质学不断获得新技术的支撑。先期应侧重近海底、三维、原位、多参量、大深度、高分辨率、高精度、直视探测和取样技术研发,包括发展非活动热液区硫化物资源调查、综合评价技术,热液硫化物形成与生命过程实验模拟技术,热液活动探测和监测技术,热液区钻探技术及装备,热液硫化物开采和利用技术等。

三、海底热液地质学的研究方法

进行海底热液地质学研究,需要组织与实施海上调查和现场监测工作,强调现场调查和长期监测相结合,技术研发和基础理论研究相结合,加强多学科交叉研究,为相关计划与国际合作的执行提供服务和支撑。同时,在调查研究基础上,针对具体科学问题,设计出相关的实验和数值模拟方案,将有助于海底热液地质学研究工作的深入开展。

(1) 热液柱:通过获得的温度、盐度、密度和浊度等数据资料,初步确定热液柱存在的范围,结合热液柱水体中 Fe、Mn 和 CH_4 等化学数据以及热液柱颗粒物的物理特征,研究热液柱的异常情况、形成演化过程及其扩散机制,示踪热液喷口的位置。

(2) 喷口流体:通过对喷口流体的温度、pH、元素、同位素以及气体含量等的测定,研究喷口流体的特征、来源、循环途径以及与其他热液产物之间的关系,了解流体所经历的深部过程。

(3) 热液硫化物:通过对热液硫化物的矿物组成、结构构造以及化学组成等特征的了解,研究硫化物的形成机制及其后期的演化过程,揭示热液硫化物记录的流体、岩浆活动等深部过程及信息。

(4) 热液区生物:将热液区中的生物作为热液地质学的研究样品之一,通过研究生

物与热液活动的关系,了解热液活动对生物的影响以及生物对热液活动及其他热液产物的作用,目的是解决涉及生物的热液地质学问题。

(5) 含金属沉积物:通过对受热液活动影响的沉积物进行系统的矿物、化学、生物和有机质等多方面的研究,了解含金属沉积物对热液活动信息的记录情况,揭示热液活动的特征及演化等。

(6) 热液蚀变岩石:在充分了解岩石的矿物学和地球化学特征的基础上,探讨热液-岩石相互作用过程中,热液活动对岩石矿物组成、元素含量和同位素特征的影响以及岩石对热液活动的物质贡献等。

四、海底热液地质学与其他学科的关系

海底热液地质学以地质学、地球化学、地球物理学、海洋生物学、海洋化学和物理海洋学等学科为基础,引入上述学科的方法、原理和技术,以热液活动及其产物以及它们所涉及的环境为研究对象,围绕海底热液地质学的基本目标,通过热液地球化学(hydrothermal geochemistry)、热液成因矿物学(hydrothermal genetic mineralogy)、热液蚀变岩石学(hydrothermal alteration petrology)、热液沉积学(hydrothermal sedimentology)、热液成矿学(hydrothermal metallogeny)和热液生物学(hydrothermal biology)等多方面的研究(Zeng et al., 2010),了解热液活动及其产物与环境的关系,热液系统及其环境中的元素起源、迁移和转化规律以及热液活动与生物之间的相互作用关系,解决海底热液活动这一自然现象所涉及的科学问题(图 1-2)。

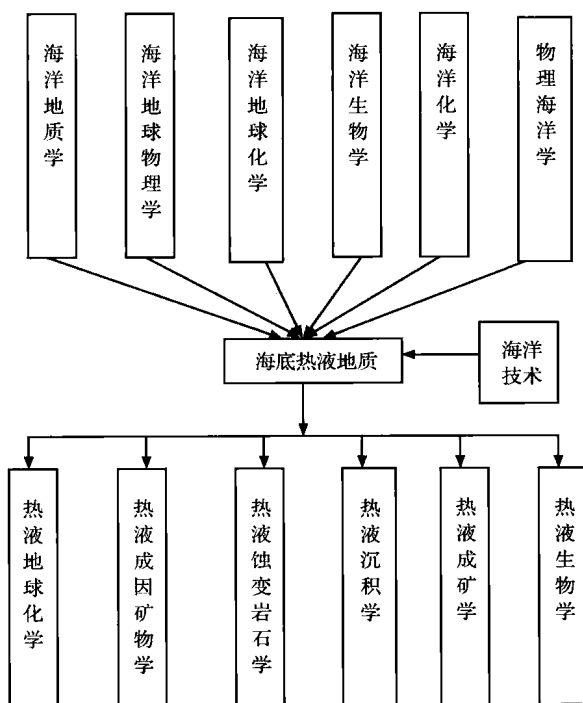


图 1-2 海底热液地质学的主要构成及与其他学科的关系

第二节 海底热液活动研究的基本概念

海底热液活动(seafloor/submarine hydrothermal activity)是海底的一种自然现象,由热液流体(hydrothermal fluid)、热液柱(hydrothermal plume)、喷口生物(vent organism)和硫化物等热液产物(hydrothermal product)构成。

热液流体[又称为热水(hot water)或热液]包括喷口流体(vent fluid)和海底下的流体,海水、沉积物中的孔隙水、岩石中的结晶水和孔隙水以及从岩浆中释放出的流体组分等均可构成热液流体的源。喷口流体[又称为热泉(hot spring)]大多呈酸性,也可呈碱性(如Lost City热液区的喷口流体pH为9~11),温度可与海水(2℃)接近,也可高达300℃,其主要由水(H₂O)组成,还含有其他多种化学组分,如Li、Na、K、Rb、Fe、Mn、Cu、Pb和Zn等元素。热液活动喷出的流体根据颜色可以分为黑色(主要由流体中所含硫化物颗粒物所致)、白色(含硫酸盐颗粒物所致)、黄色(含硫黄颗粒物所致)、灰色(硫酸盐颗粒物和硫化物颗粒物混合所致)和无色(以液体为主,流体中颗粒物极少)五种主要颜色。热液流体可以包含液相、气相和固相三种相态的物质,热液流体的相态特征与流体温度及所处的压力有关。与喷口流体相比,目前人们对热液区海底面以下流体的了解还很少。

热液柱(又称为热液羽状体)是由喷口流体与周围冷海水相遇后形成的,其在物理化学性质上与喷口流体有很大的区别。因喷口流体的密度与海水(1.03g/cm³)相比偏小,加之压力偏大,可使喷口流体脱离喷口,呈羽状体(截面上)上浮,达到中性浮力面,并漂出一定的距离。结构上,热液柱可由热液颈/茎(hydrothermal neck/stem)和热液帽(hydrothermal cap)[或称为热液透镜体(hydrothermal lens)]两部分组成。其中,热液颈是指热液柱从喷口到热液柱中性浮力面之间的部分,该部分的流体浮力大于其重力,具有上浮力。热液帽是指热液柱的中性浮力面部分,该部分的流体重力与浮力达到平衡,不再具有上浮力。热液柱与周围海水的界限主要通过温度、浊度、氧化还原电位和化学组成(CH₄、³He、Fe和Mn等)等指标确定。热液柱和喷口流体以喷口为界,即喷口以外对海水开放的上升流体为热液柱,喷口以内对海水相对封闭的流体为喷口流体。

喷口生物指起源于热液活动区喷口及其附近的生物,包括大生物和微生物等,即指海底面以上因热液活动存在而存在的生物,其食物和能量直接或间接来源于海底热液活动,又称为热液生物(hydrothermal organism)。

热液生物群落(hydrothermal community)特指在热液活动区分布的生物群落,其因热液活动而存在,因热液活动的停止而消亡;在热液区分布的热液生物群落,又称为热液喷口生物群落(hydrothermal vent community)。

热液产物是指所有海底热液活动过程中形成的产物,主要包括热液流体、热液柱、热液硫化物[hydrothermal sulfide,其富含Cu、Zn、Au、Ag等金属元素,又称为多金属硫化物(polymetallic sulfide)]、喷口生物、热液蚀变岩石、含金属沉积物(metalliferous sediment)和自然元属(如自然铜)等。热液产物可分布在海底表面也可分布在海底面以下。

热液堆积体(hydrothermal deposit)由热液产物堆积而成,主要由从热液流体中沉淀出的硫化物、硫酸盐等矿物组成。若热液堆积体主要由硫化物组成,又称为海底多金属硫

化物堆积体(seafloor polymetallic sulfide deposit)。热液产物可以呈烟囱体(chimney)、丘状体(mound)、脉体(vein)、网脉体(stockwork)、角砾(breccia)、壳体(crust)和球体(globe)等形态产出,其除了含各种硫化物矿物外,还包括硫酸盐、氧化物等矿物。

多个烟囱体聚集分布、成群产出构成烟囱体群(chimney group),烟囱体或烟囱体群可分布在丘状体之上,烟囱体坍塌可以堆积形成热液丘状体(hydrothermal mound,又称为热液丘)。热液丘状体,主要由坍塌的烟囱体、烟囱体碎块、块状硫化物等堆积而成,在其内部可分布着脉体和网脉体,存在着早期矿物被后期矿物交代、穿插的现象。烟囱体的形态复杂多样,可呈筒状、柱状、尖塔状和蘑菇状等。热液产物构成的地貌可分为四种类型:①烟囱状地貌;②丘状地貌;③烟囱和丘状复合地貌;④其他形态地貌。

热液烟囱根据喷出流体的颜色可以分为黑烟囱、白烟囱、黄烟囱和灰烟囱等多种类型。黑烟囱(black smoker),喷出的流体(温度为 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$)呈黑色,对应的黑烟囱体主要由硫化物矿物构成;白烟囱(white smoker),喷出的流体(温度为 $100\sim 300^{\circ}\text{C}$)呈白色,白烟囱体主要由硫酸盐矿物、非晶质二氧化硅和闪锌矿等矿物构成;黄烟囱(yellow smoker),喷出的流体呈黄色,黄烟囱体主要由自然硫构成。热液喷口(hydrothermal vent)(又称为喷口)是指喷口流体喷出或曾喷出并伴有热液产物形成的部位,烟囱体(群)、丘状体或海底裂隙处往往拥有众多的流体喷口,可以构成喷口群。喷口区(vent field)是分布着热液喷口的区域,一个热液区可以包括一个或多个喷口区。

块状硫化物(massive sulfide)指硫化物矿物含量在60%以上,矿物颗粒大小较均匀,彼此相连,具有块状或带状构造的热液产物。由块状硫化物构成的堆积体/矿床,又称为多金属块状硫化物堆积体/矿床(polymetallic massive sulfide deposit)。烟囱体和丘状体的局部或整体均可由块状硫化物构成。如果热液产物堆积体(包括多金属块状硫化物堆积体)在经济、技术和社会条件允许的情况下能被人类开采和利用,则该热液产物堆积体就称为矿体/矿床(ore deposit),否则称为矿物堆积体(mineral deposit)。

含金属沉积物(metalliferous sediment)指分布在热液活动区附近(包括洋中脊轴部附近或翼部)的未固结沉积物,由于混合了来自热液流体或热液柱的物质,记录了热液活动的信息,导致这些沉积物的无机组分中富集Fe、Mn以及多种微量元素,相对亏损Al和Ti,不同于因热液-沉积物相互作用产生的热液蚀变沉积物。该含金属沉积物在成因上也不同于红海的含金属沉积物[又称为富金属沉积物(metal-rich sediment)]。红海含金属沉积物的形成与红海的热卤水(hot brine)[又称为热液卤水(hydrothermal brine),高盐卤水(highly saline brine)]有关,该热卤水被认为是海水与玄武岩、中新世蒸发岩相互作用的产物。

热液区(hydrothermal field)由一个或多个空间位置相对接近、形成环境(构造、沉积物和/或岩石)基本一致的热液点(hydrothermal site)组成。根据热液区中是否存在正在活动的热液流体,可分为热液活动区/点(hydrothermal activity field/site)和非活动热液区/点两大类。热液点是热液产物(这里热液柱、含金属沉积物除外)的分布点,其内可分布着一个或多个连续或不连续分布的烟囱体(群)、丘状体等。一个热液点可以包括一个或多个喷口区。有硫化物分布的热液区/点可以称为热液硫化物分布区/点(hydrothermal sulfide field/site)或多金属硫化物分布区/点(polymetallic sulfide field/site)或热液