



西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价

“十三五”科学出版社重点出版物出版规划项目

中国大洋矿产资源研究开发协会资助

“西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价”丛书

洋中脊多金属硫化物 勘查方法与技术

陶春辉 等◎著

Exploration Methods and Techniques for
Polymetallic Sulfide on the Mid-Ocean Ridges



科学出版社

国大洋矿产资源研究开发协会资助

“西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价”丛书

洋中脊多金属硫化物 勘查方法与技术

陶春辉 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要讲述了洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术,是对当前洋中脊硫化物勘查方法与技术的最新成果的介绍和总结。对洋中脊热液系统的物理、化学性质进行了分析,并从热液羽状流、地球物理、地形地貌、地质、地球化学和生物等方面介绍了洋中脊多金属硫化物找矿标志;有针对性地从事羽状流探测、地球物理探测、地质取样、深海潜器探测和海底长期观测平台等方面阐述了洋中脊硫化物探测方法和技术;最后总结提炼出洋中脊多金属硫化物勘查方法,并通过我国在大洋中脊及西南印度洋多金属硫化物研究区的硫化物探测实例介绍了勘查方法的应用。

本书可以作为从事海底矿产资源、海洋地质、海洋地球物理和海洋技术等学科的研究人员和高等院校相关专业教师、研究生的参考书,也可以作为高年级本科生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术/陶春辉等著. —北京:科学出版社, 2018.11

(西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价)

ISBN 978-7-03-059026-8

I. ①洋… II. ①陶… III. ①洋中脊—海底矿物资源—硫化物矿床—矿产勘探—研究 IV. ①P736.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 226853 号

责任编辑:朱 瑾 田明霞 / 责任校对:郑金红

责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码 100723

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 400 000

定价: 258.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价”

丛书编委会

指导委员：李家彪 李 波 郑玉龙 李裕伟 黄永祥

主 编：陶春辉

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈建平	邓显明	董传万	李江海	李 伟
梁 锦	廖时理	刘 佳	刘 颖	刘镇盛
倪建宇	阮爱国	苏 新	王汉闯	武光海
王叶剑	王 渊	吴 涛	席振珠	杨伟芳
杨 振	章伟艳	周建平	周亚东	周 洋

《洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术》作者名单

陶春辉 梁 锦 王汉闯 苏 新 蔡 巍 廖时理
杨 振 周 洋 李 伟 陈 升 吴 涛 杨伟芳
黄 威 周亚东 李怀明 孙晓霞 丘 磊 张国堙
邓显明 王 渊 韩沉花 吕士辉 刘 健 陈志刚
吴家林 刘为勇 周红伟 顾春华 熊 威 陈 杰
朱忠民 郭志旭 王 晁 汪建军 李倩宇 潘东雷



探秘西南印度洋

序

深海蕴藏着地球上远未认识和开发的宝藏，是人类未来生存和发展的战略新疆域。深海资源开发、深海环境保护、深海技术装备发展和深海治理是当今国际深海活动的重要主题。

我国自 20 世纪 80 年代启动太平洋多金属结核资源调查。1990 年随着中国大洋矿产资源研究开发协会的成立，我国大规模深海资源勘查与深海活动全面展开，先后启动东太平洋多金属结核、西太平洋富钴结壳、洋中脊多金属硫化物和富稀土沉积物等多种资源的勘查工作，并同步开展了深海生物基因和各勘探区的环境基线、生物多样性调查研究。到 2018 年，我国已经成为国际上拥有国际海底资源勘探合同区种类最齐全、数量最多的国家，包括 1 个多金属硫化物、2 个多金属结核和 1 个富钴结壳勘探合同区。我国在三大洋开展深海资源勘查的战略布局已经形成，并带动了我国深海技术的飞跃发展，提高了我国在国际上的话语权。

海底热液活动是发源于活动板块边界和板块内部、在岩石圈层和大洋水圈之间进行能量和物质交换的过程，对认识整个地球内部岩浆活动、火山活动和构造运动等具有指示性意义，在当前深海科学研究中占据重要地位。其中洋中脊热液系统，是发育在洋中脊的热液活动及其所处物理、化学和生物环境构成的有机整体。海底热液活动引起的热液成矿作用促使海底成为一个待开发的矿产资源宝库。作为一种重要的战略资源，洋中脊多金属硫化物资源越来越受到各国政府和财团的重视。

中国大洋矿产资源研究开发协会（以下简称“中国大洋协会”）在 2005 年开展了首次环球科考，由此开启了全球洋中脊硫化物资源的系统调查研究，并于 2007 年在西南印度洋首次发现了超慢速扩张脊活动热液区，并在三大洋（太平洋、大西洋、印度洋）取得了大量发现。随着 2011 年我国率先与国际海底管理局签署了国际海底多金属硫化物勘探合同，在西南印度洋获得了 1 万 km^2 的勘探合同区，我国对海底多金属硫化物已从科学调查研究转入资源勘查与环境评价的阶段。该勘探合同将持续 15 年，在第 8 年完成 50% 区域放弃，第 10 年完成 75% 的区域放弃。

不同于陆地矿产资源勘查，海底多金属硫化物勘探刚刚兴起，国际上无先例可循，极具探索性和挑战性。不仅需要发展海底硫化物成矿理论、总结找矿标志、研发探测技术，同时需要更谨慎对待勘探过程中对深海环境潜在的影响。深海环境保护是国际海底工作的重要领域，日益受到国际社会广泛关注。《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》要求在勘探区内收集环境基线数据并确定环境基线，用于评估勘探开发活动可能对海洋环境造成的影响。同时，还要求建立和实施对海洋环境影响的监测计划。

西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价团队在中国大洋矿产资源研究开发协会的领导和科技部、国家自然科学基金委、原国家海洋局等有关项目的资助下，通过十

多个航次，组织国内优势力量开展技术攻关，创建了快速找矿与初步评价方法技术体系，取得了洋中脊硫化物成矿理论、找矿方法技术和硫化物资源潜力评价等方面突破。不仅在西南印度洋发现了国际上首个超慢速扩张脊的活动热液区，还在东太平洋海隆赤道附近、大西洋 10°以南、北印度洋实现首个发现并证实大量海底热液活动区，为国际海底热液活动调查研究做出了重大贡献。同时实现了我国在国际海底多金属硫化物发现“零”的突破，推动我国成为海底硫化物调查先进国家。该团队基于十多年来的航次调查经验和研究成果，组织力量编写“西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价”丛书，将从多学科、多角度及时总结介绍洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术、洋中脊多硫化物成矿预测和资源量评价方法等。该系列丛书的出版，将有助于提高我国海底热液活动调查研究水平和海底多金属硫化物勘探能力，促进我国深海科学技术的发展，同时对相关国家的洋中脊硫化物勘查具有示范作用。

中国工程院院士

2018年10月8日

前 言

自 1977 年“Alvin”号载人潜水器第一次观测到海底热液活动以来,海底热液活动一直是国际海底研究的热点。热液活动伴生的海底多金属硫化物由于富含 Cu、Zn、Au 和 Ag 等金属元素,全球争相开展调查研究。同时,海底热液活动伴生的热液生物及其多样性,日益受到科学家和国际社会的关注。

海底多金属硫化物主要分布于大洋中脊和弧后盆地扩张中心,水深在数百米到数千米之间,以大于 2000m 水深为主,其中 65%分布在洋中脊。全球 65000km 长的洋中脊目前还没有被详细调查过的占 80%。据估计,已经发现的海底多金属硫化物资源的规模约为 6×10^8 t,其中含有的 Cu、Zn 资源量约为 3×10^7 t。2010 年 5 月,国际海底管理局第 16 次会议通过了《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》。2011 年 11 月,中国大洋矿产资源研究开发协会率先与国际海底管理局正式签署了多金属硫化物勘探合同,使我国在海底多金属硫化物勘探方面走在了世界前列。这是世界上首个获批的国际海底多金属硫化物勘探合同。此后,俄罗斯、韩国、法国、德国、印度和波兰相继申请并获得了国际海底硫化物勘探合同。

虽然海底热液活动及其伴生的硫化物已经被发现了近 40 年,但由于它身处洋中脊深处,热液区直径范围往往只有几十米至上百米,要发现它可谓“大海捞针”。以往各国开展的海底热液活动和硫化物调查,大多以针对科学问题开展的调查研究为主,发展了以羽状流探测为主的调查技术,未能形成较系统的找矿方法技术。自从《“区域”内多金属硫化物探矿和勘探规章》通过后,对洋中脊硫化物资源的勘查技术方法才开始研究、发展。

我国从 2005 年开始海底热液活动和多金属硫化物的规模调查研究。当时在洋中脊硫化物调查方法、技术几乎没有储备。在中国大洋协会、科技部、原国家海洋局等单位的支持和推动下,我们将海上勘查与成矿理论相结合,总结出洋中脊硫化物找矿标志,与技术团队一起开展找矿方法技术攻关,形成了一套行之有效的洋中脊硫化物找矿方法技术体系,并在三大洋海底硫化物调查取得重要发现。

本书总结了目前洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术的最新进展,供从事海底矿产资源、海洋地质、海洋地球物理和海洋技术等学科的研究人员和高等院校相关专业师生参考。

本书分 9 章,第 1 章介绍洋中脊热液活动与多金属硫化物,由陶春辉、黄威、杨伟芳、梁锦等撰写;第 2 章介绍洋中脊热液系统的物理、化学特征,由陈杰、陈升、吴涛、黄威、李倩宇和周亚东等撰写;第 3 章介绍洋中脊多金属硫化物找矿标志,包括羽状流标志、地球物理标志、地形地貌标志、地质标志、地球化学标志和生物标志,由陶春辉、陈升、王汉闯、苏新、吕士辉、杨振和周亚东等撰写;第 4 章、第 5 章、第 6 章分别从

羽状流及其水体异常探测、地球物理探测和地质取样等方面介绍洋中脊硫化物勘查技术,第4章由陈升、王渊、吴家林、王昇、韩沉花、陈志刚和孙晓霞等撰写,第5章由陶春辉、郭志旭、王昇、丘磊、王汉闯、张国堙、熊威、汪建军、朱忠民和吴涛等撰写,第6章由蔡巍等撰写;第7章介绍洋中脊多金属硫化物勘查平台——深海潜水器与海底长期观测,由蔡巍、邓显明、刘健、梁锦和王渊等撰写;第8章介绍洋中脊多金属硫化物矿床勘查方法,由陶春辉、杨振和廖时理等撰写;第9章介绍调查方法综合应用实例,由邓显明、梁锦和廖时理撰写。全书由陶春辉、梁锦、王汉闯、李伟和潘东雷统稿、校稿,项目组研究生黄玉强、吴荣荣、黄亮、孙金烨、聂佐夫等协助校稿。

本书的出版得到了中国大洋协会办公室和国家海洋局第二海洋研究所领导的大力支持。在撰写过程中得到了国家重点研发计划“透视超慢速扩张洋脊热液循环系统”(2018YFC0309901、2018YFC0309902)、中国大洋协会“十三五”重大项目“多金属硫化物合同区资源勘探与评价”(DY135-S1-1)、国家重点研发计划(课题)(2017YFC0306803、2017YFC0306603、2017YFC0306203)、国际海域资源调查与开发“十二五”重大项目“西南印度洋多金属硫化物合同区资源评价”(DY125-11)、973计划课题“硫化物矿区特征和找矿标志”(2012CB417305)、国际海底管理局捐赠基金“International Cooperative Study on Hydrothermal System at Ultraslow Spreading SWIR”和原国家海洋局国际合作基金“南太平洋岛国海底资源勘查与合作研究”等课题的资助。本书是西南印度洋多金属硫化物资源与环境评价团队及其他团队在中国大洋协会全球航次以来海底硫化物调查、研究的经验总结,是专家组、各位参加项目和航次支撑的专家、全体科考队员的集体智慧的结晶。在本书编写过程中,李裕伟研究员、黄永样教授级高工、董传万教授和徐启东教授提出了大量有益的建议和修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于笔者水平及目前洋中脊多金属硫化物勘查所处的阶段,本书肯定存在许多不足之处和可商榷之处,敬请读者批评指正。本书作为集体智慧结晶,有些工作未能详尽地列出所有贡献者或参考文献,在此表示感谢和歉意。



2018年9月8日于杭州

目 录

1 洋中脊热液活动与多金属硫化物	1
1.1 洋中脊热液活动	1
1.2 洋中脊多金属硫化物	4
1.3 洋中脊多金属硫化物勘查现状	11
参考文献	15
2 洋中脊热液系统的物理、化学特征	20
2.1 热液喷口流体特征	20
2.2 热液羽状流特征	27
2.3 硫化物与围岩物理特征差异	28
2.4 热液沉积物特征	32
2.5 热液生物特征	34
参考文献	35
3 洋中脊多金属硫化物找矿标志	40
3.1 羽状流标志	40
3.2 地球物理标志	48
3.3 地形地貌标志	56
3.4 地质标志	57
3.5 地球化学标志	60
3.6 生物标志	68
参考文献	72
4 洋中脊多金属硫化物勘查技术——羽状流及水体异常探测	79
4.1 温度探测	80
4.2 浊度探测	82
4.3 甲烷探测	85
4.4 流速探测	87
4.5 声学探测羽状流	100
4.6 电化学传感器探测	103
4.7 金属元素和 ^3He	108
4.8 悬浮体矿物颗粒	113
参考文献	118
5 洋中脊多金属硫化物勘查技术——地球物理探测	124
5.1 重力探测	124

5.2	海底声学探测	132
5.3	OBS 探测	142
5.4	多道地震探测	155
5.5	视像探测	166
5.6	电法勘探	168
5.7	磁法勘探	182
	参考文献	187
6	洋中脊多金属硫化物矿床勘查技术——地质取样	196
6.1	电视抓斗	196
6.2	多管取样器	198
6.3	重力取样器	200
6.4	箱式取样器	202
6.5	拖网取样器	204
6.6	海底钻机	205
	参考文献	208
7	洋中脊多金属硫化物勘查平台——深海潜水器与海底长期观测系统	209
7.1	AUV 及搭载设备在热液区的应用	209
7.2	ROV 及搭载设备在热液区的应用	213
7.3	HOV 及搭载设备在热液区的应用	217
7.4	热液区长期观测网	220
	参考文献	223
8	洋中脊多金属硫化物矿床勘查方法	226
8.1	洋中脊多金属硫化物矿床勘查的基本特征	226
8.2	洋中脊多金属硫化物矿床勘查策略	229
8.3	国外海底多金属硫化物矿床勘查方法	230
8.4	我国现阶段洋中脊多金属硫化物矿床勘查方法	234
	参考文献	243
9	勘查方法综合应用实例	245
9.1	“三步法”在远景调查阶段应用	245
9.2	一般勘探阶段应用——西南印度洋“玉皇 1 号”矿化区	255
	参考文献	257
	附录 本书作者简介	258

1 洋中脊热液活动与多金属硫化物

洋中脊发育的热液活动及所处的物理、化学和生物环境构成了一个有机整体，即洋中脊热液系统。在洋中脊热液活动过程中可形成多种热液产物，包括热液流体、热液柱、热液硫化物、热液蚀变岩石、含金属沉积物。其中，热液硫化物通常富含 Cu、Zn、Au、Ag 等金属元素，亦称为多金属硫化物。多金属硫化物是下渗的海水在洋壳深部，受深部热源加热，淋滤出洋壳中的重要金属元素，在返回海底喷发过程中与海水发生化学交换和物质沉淀的产物。经热液活动长久喷发并沉淀的多金属硫化物，可以形成规模较大的矿床，并最终作为一种可被开采的多金属矿产资源，它的合理开发为满足人类对多金属矿产资源的需求提供了可能。

1.1 洋中脊热液活动

1.1.1 洋中脊热液活动与热液系统

海底热液活动是当今地学界和生物学界的重大前沿研究领域之一。早在 20 世纪 60 年代，就已有证据显示海底热液活动的存在。例如，红海发现热卤水，钻孔和蛇绿岩套中发现多金属沉积物，以及海底发现经热液流体与海水作用后的蚀变岩石 (Corliss et al., 1979)。1977 年，法国与美国两国联合使用“Alvin”号载人潜水器对东太平洋海隆的 Galápagos 扩张中心进行考察，首次发现了现代海底热液和高温成矿活动 (Corliss et al., 1979)。1978 年，在东太平洋海隆 21°N 首次观察到正在喷发的黑烟囱 (Francheteau et al., 1979; Spiess et al., 1980)，揭开了现代海底热液活动与热液系统研究的序幕。随着国际大洋调查活动的不断深入，截至 2015 年，已发现的海底热液区和异常区超过 600 个 (<http://www.interridge.org>)。伴随着诸如自主式水下机器人 (AUV) 及载人潜水器 (HOV) 等深海探测技术的应用和发展，更多的热液活动也将逐步被发现 (Jamieson et al., 2014; 杨伟芳, 2017)。

洋中脊热液活动是集中发生在洋中脊及离轴区内的海底热液活动。由于洋中脊具有特殊的板块构造背景和活动形式、复杂的圈层结构和岩石类型，形成了独特的热液系统。现今，在全球不同扩张速率洋中脊均发现了海底热液活动，热液循环过程已成为洋中脊热液系统的重要组成部分。一般来说，海底热液系统由三部分组成 (图 1-1)：补给区、反应区和释放区 (Humphris and Mccollom, 1998)。

洋中脊是大洋板块增生和分离的策源地，洋中脊的构造演化在固体地球与海洋的能量物质循环之间扮演了重要角色。沿扩张洋中脊分布的海底热液活动改变了洋壳的物质组成，影响了海水的化学成分，并为深海生物群落提供了能量源泉 (Tivey, 2007)。在洋中脊热液系统中，与热液活动密切相关的海水、洋壳岩石 (玄武岩、辉长岩)、热液

流体和热液产物是 4 个独立存在但又彼此关联的单元，其中海水和洋壳岩石是热液系统形成的两大物源，而热液流体和热液产物代表了两大物源在热液系统不同区域和不同阶段相互作用后的产物。

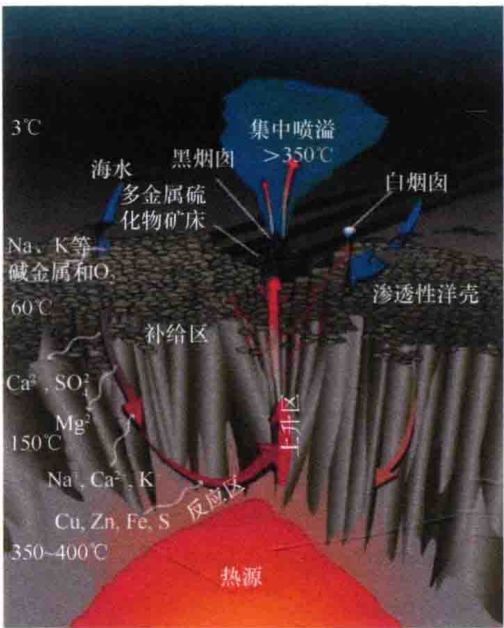


图 1-1 海底热液循环系统示意图 (Humphris and Mccollom, 1998)

岩浆沿通道上涌，在海底形成了新的洋壳。冷海水从洋壳断裂或微裂隙中向下渗透，下渗过程中被岩浆等热源加热，从围岩中淋滤出 Cu、Fe、Zn 等金属元素，随后又沿裂隙上升从海底喷出，形成烟囱体结构（即黑烟囱）及热液羽状流（图 1-2）。近年来，随着海底热液活动调查和研究的深入，人们逐渐认识到以超基性岩为基底岩石的热液系统在全球扩张洋脊也广泛发育 (Koschinsky et al., 2007)。因此，对洋中脊热液活动的调查极大地促进了人类对洋中脊热液系统的认识。

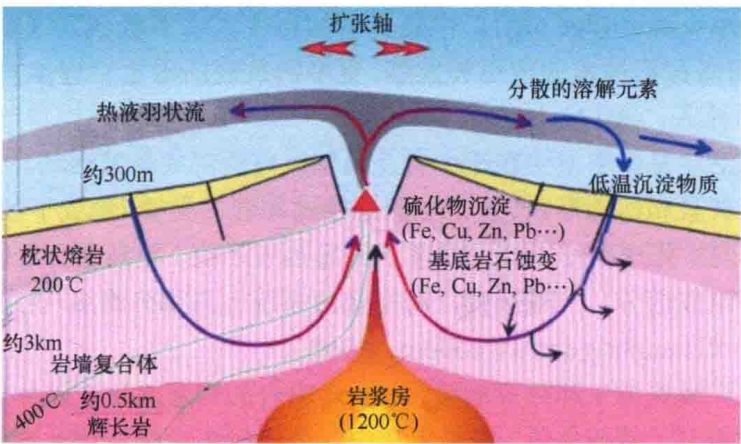


图 1-2 洋中脊热液循环系统及多金属硫化物形成示意图 (Pandy, 2013)

洋中脊热液活动还是一种正在发展演化中的成矿过程，是认识地球内部结构与物质组成的一个重要窗口，是研究成矿过程的“天然实验室”。现代海底多金属硫化物矿床为认识火山成因块状硫化物（VMS）矿床提供了最直接的证据。此外，与洋中脊热液活动同时被发现的还有伴生的依靠化能合成作用生存的特殊生物群落，这被认为是迄今为止深海生物学界最令人激动的发现之一。

1.1.2 洋中脊热液活动分布

近几十年的研究表明，现代海底热液活动在不同的构造背景下均有发育，包括约 65 000km 的洋中脊、7000km 的弧后盆地、22 000km 的火山岛弧，其中大约 65% 的热液活动分布于洋中脊（图 1-3）。根据洋中脊扩张速率的不同，2003 年，Dick 和 Lin（2003）将洋中脊划分为五类：超快速扩张洋中脊（全扩张速率 $>120\text{mm/a}$ ）、快速扩张洋中脊（全扩张速率为 $80\sim120\text{mm/a}$ ）、中速扩张洋中脊（全扩张速率为 $50\sim80\text{mm/a}$ ）、慢速扩张洋中脊（全扩张速率为 $20\sim50\text{mm/a}$ ）、超慢速扩张洋中脊（全扩张速率 $<20\text{mm/a}$ ）。在目前已发现的海底热液区中，快速、中速、慢速和超慢速扩张洋脊的比例分别为 16%、12%、13% 和 13%（Hannington et al., 2011；杨伟芳，2017）。

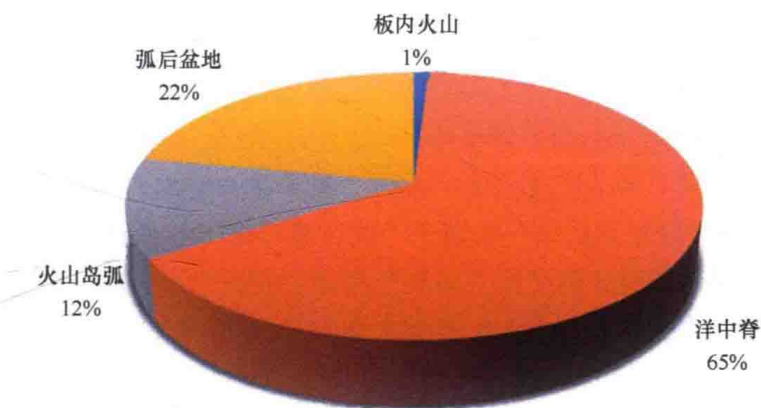


图 1-3 不同构造背景下的海底热液活动分布（Hannington et al., 2011）

自从现代海底热液活动现象及相关热液产物被发现并报道之后，洋中脊热液活动调查研究工作进展迅速，在东太平洋海隆、大西洋中脊、印度洋中脊等全球各大洋中脊均发现了热液活动（Edmonds et al., 2003；Herzig and Dreier, 1999；Rona et al., 2013；Tao et al., 2013）。此外，从南半球的极地洋脊（Klinkhammer et al., 2001；Rogers et al., 2012）到冰雪覆盖的北冰洋洋脊（Edmonds et al., 2003；Petersen and Hein, 2013）都存在热液活动（图 1-4）。目前，国际上对洋中脊热液活动的调查主要集中在拥有大量海洋调查船只的国家，调查区域主要集中在中低纬度气候条件较好的区域，因此全球扩张洋脊还有许多地方尚未开展调查（German and Seyfried Jr, 2014）。

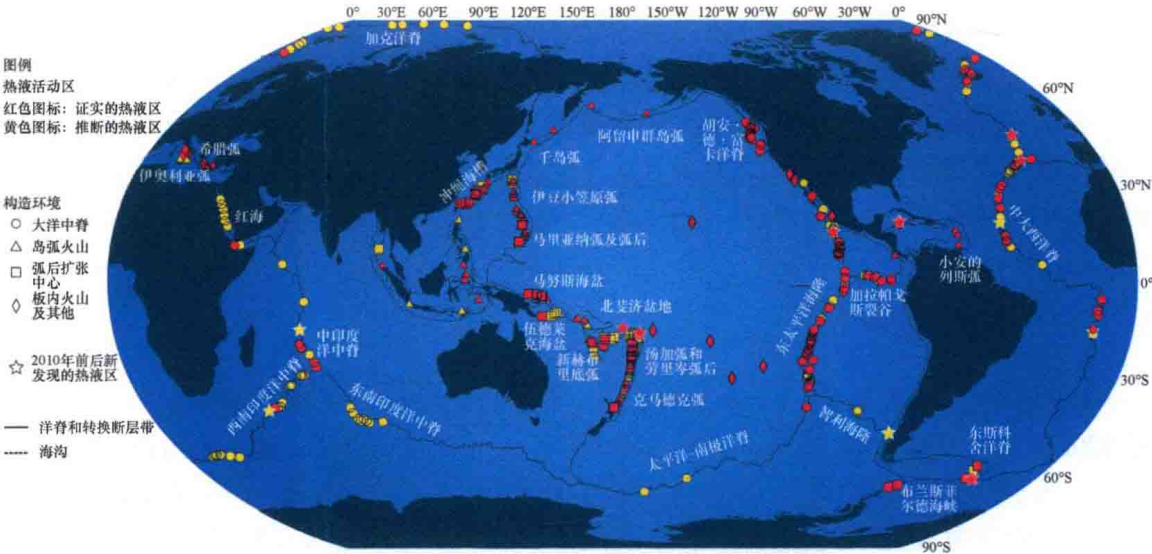


图 1-4 全球确认和推断的海底热液区分布

(来自 InterRidge 网站: http://vents-data.interridge.org/files/Ventmap_2009.jpg)

1.2 洋中脊多金属硫化物

1.2.1 洋中脊多金属硫化物的形成

海底热液活动会引起洋壳的广泛蚀变,在现代洋壳和陆地蛇绿岩带中观察到的成矿元素的亏损现象,指示了多金属硫化物矿床内金属元素的来源(Alt, 1999; Jowitt et al., 2012)。洋中脊多金属硫化物矿床一般属于“镁铁质”或“超镁铁质”围岩型矿床的范畴,海水与洋壳之间化学组分的交换方向和范围往往取决于洋壳所处位置的温度和渗透性,这在垂向深度上尤其明显(Jowitt et al., 2012)。以大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP) 1256D 孔所获取的席状岩墙和深成杂岩体层段为例,相对于洋壳上部的火山岩层段,源区洋壳的主要层段(即席状岩墙和深成杂岩体)更容易亏损成矿元素,且几乎所有的成矿金属元素都明显低于原始洋壳中的含量(Alt et al., 2010; Patten et al., 2016)。从源区洋壳内淋滤出的成矿物质的规模各异,部分因为矿化作用而被束缚在过渡带内或席状岩墙的上部区域内,但大部分还是会被运移堆积在海底表面(Alt et al., 2010)。

洋壳的上部火山岩层段是下渗海水与洋壳发生初始反应的场所(图 1-5)(Coogan, 2008; German and Seyfried Jr, 2014; Tolstoy et al., 2008)。目前科学界对于发生在侧翼下渗区地质过程的了解主要依靠对蚀变洋壳样品的矿物组合特征进行实际观测和大量数据分析(Tivey, 2007)。当温度达到 40~60℃时,海水与玄武岩的反应导致玄武质玻璃、橄榄石和斜长石发生蚀变,氧化为含铁云母和蒙脱石、富镁蒙脱石和铁氢氧化物等,碱金属(K、Rb、Cs)和 B 从海水中迁移进入蚀变矿物中,而 Si、S、Mg 等元素从矿物中迁移进入流体(图 1-5b)(Alt, 1995; Tivey, 2007)。当海水下渗的更深,并被加

热到 150℃ 以上时, 就会发生黏土类矿物的沉淀, 如富镁蒙脱石和绿泥石可在温度低于和高于 200℃ 的时候分别形成, 从而消耗流体中的 Mg。因此, 流体中 Mg 含量的降低反映了源区洋壳内绿泥石的形成 (Alt, 1995; Tivey, 2007)。最终, 源区洋壳会形成绿泥石+角闪石+次生斜长石+石英±帘石±硬石膏的次生矿物集合体 (German and Seyfried Jr, 2014)。

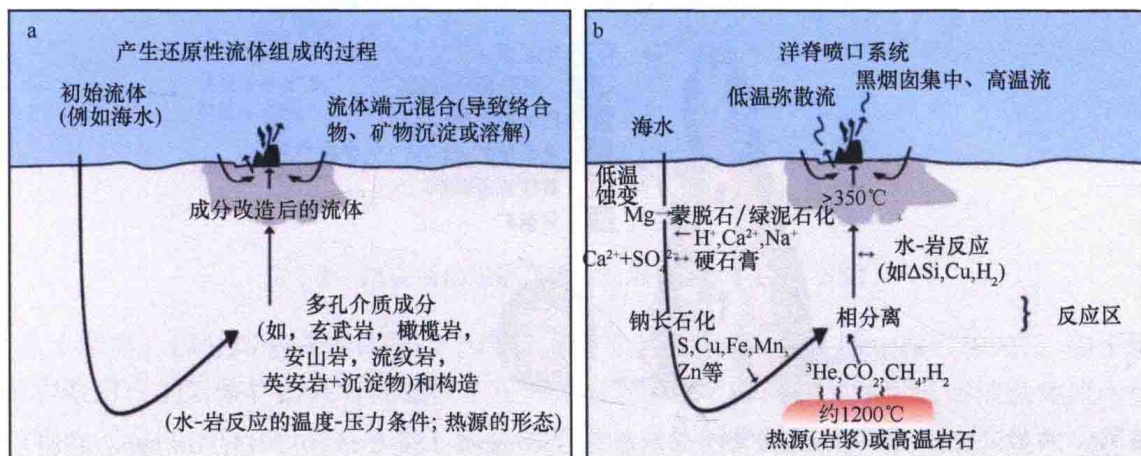


图 1-5 洋中脊热液循环和成矿作用示意图 (Tivey, 2007)

a. 洋壳内热液循环系统示意图; b. 大洋中脊喷口流体形成过程示意图

深部或反应区中形成的流体相对于冰冷的海水 (约 2℃) 极具浮力, 因此能以极快的速度上升到海底。前人对洋壳蚀变岩石样品的观察发现, 这些岩石保存并记录了在较长时间内发生的水岩反应过程, 结合热力学的计算和流体的成分测试, 进一步表明在上升过程中流体并没有与围岩达到平衡 (von Damm, 1995)。当流体上升时, 伴有少量的硫化物沉淀析出和/或溶解, 而反应结果通常会在岩石记录中得以保存, 如在蛇绿岩套中发现的绿帘石+石英+绿泥石矿物组合, 或是在热液区表层发育很好的网状脉体等 (Alt, 1995; Tivey, 2007)。

前人对全球热液硫化物区的研究揭示了 3 种完全不同的矿化类型: ①形成于高温集中喷溢热液流体的块状硫化物丘体 (如大西洋 TAG 热液区); ②来自低温弥散流的 Fe-Mn 羟基氧化物和硅酸盐的堆积体; ③来自热液羽状流的细小颗粒沉淀物。其中, 块状硫化物堆积体只占有被搬运到海底的可溶性成矿物质的一小部分, 而搬运来的大部分物质通过浮力和非浮力羽状流扩散到了洋脊的侧翼 (German and Seyfried Jr, 2014)。

在东太平洋海隆 21°N 热液区对硫化物烟囱体取样研究后得到的烟囱体生长模型至今依旧适用 (图 1-6) (Goldfarb et al., 1983; Haymon, 1983; Tivey, 2007)。由于海底热液流体具有温度高、微酸性及富含金属、硫化物和 Ca 的特征, 当它以每秒几十厘米的速度喷入冷的 (约 2℃)、微碱性、缺乏金属、富含硫酸盐和贫 Ca 的海水中时, 硬石膏和细晶的 Fe-Zn 和 Cu-Fe 硫化物就发生沉淀。围绕着烟囱喷口, 硬石膏沉淀物形成环状屏障阻止了热液流体与海水的直接混合, 因此, 其他矿物可以在原有的烟囱体基底之上沉淀。黄铜矿在紧靠着烟囱体内壁处形成, 热液流体和海水穿过新形成的烟囱壁以扩

散和对流的形式混合。这些地质过程导致了热液流体中的硫化物和硫酸盐逐渐饱和并沉淀在烟囱墙壁的孔隙空间中，烟囱壁的渗透性因此逐渐变差。如果烟囱通道一直保持畅通，大多数的热液流体会通过通道从烟囱喷口喷出，形成巨大的热液羽状流，并沉淀出大量的金属矿物。

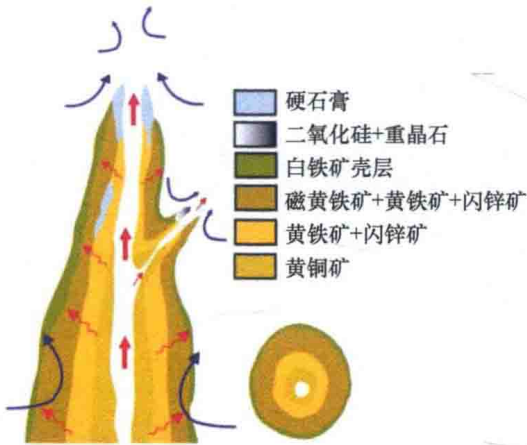


图 1-6 典型黑烟囱体横纵剖面的矿物分带示意图 (German and Seyfried Jr, 2014; Haymon, 1983)
箭头代表了推测的热液流体的运移方向

大西洋 TAG 热液区硫化物丘体是迄今为止在扩张洋脊中心发现的最大规模的独立热液堆积体。ODP158 航次的钻探研究显示，其内部结构特征与烟囱体也存在相似性 (Humphris et al., 1995; Petersen et al., 2000)。黑烟囱流体高度集中，自复合烟囱体中心喷涌而出，形成黑色的巨型浮力羽状流 (Rona et al., 1986)。部分海水进入规模巨大的堆积体内，引发了硬石膏、黄铜矿、黄铁矿在堆积体内部的沉淀及金属元素的重新活化 (Tivey, 1995)。通过 ODP158 航次获得的岩心研究发现，此热液丘体下存在着一种黄铁矿、硬石膏、硅化及绿泥石化玄武质角砾岩和网状岩脉的序列 (Humphris et al., 1995)，You 等 (You and Bickle, 1998) 将 ODP 硫化物岩心样品的 ^{230}Th 年龄与 Humphris 等 (1995) 建立的丘体分带联系起来，发现该矿床最老的年龄 (11~37ka) 位于该矿床中央层，其底部和顶部年龄最为年轻 (2.3~7.8ka)。地层学及年代学研究证实了大部分的硫化物和硬石膏是通过海水和热液流体的混合而沉淀的，热液活动间隔在 2ka 以上。无论对于 TAG 热液区硫化物丘体这样的现代热液系统，还是造山带蛇绿岩中的塞浦路斯型硫化物矿床，其矿物学和化学特征都可以用区域富集作用较好地解释 (Hannington et al., 1998) (图 1-7)。

洋中脊多金属硫化物矿床的规模、分布特点主要受洋脊地形、构造及岩浆作用等因素控制 (Fouquet, 1997)。不同扩张速率洋中脊，其矿床规模和分布特点存在显著差异。地质学家认为热量和岩浆供给在洋脊地形、构造和硫化物矿床规模等方面起着重要的作用。

在快速扩张洋中脊，岩浆供给速率较快，岩石圈板块较热，隆起顶部不会消失，其轴部通常为狭窄的裂缝 (宽 50~300m)，如东太平洋隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 。洋壳的快速扩张形成近乎等宽的轴部地堑，岩浆房沿地堑中央线性分布，且一般位于海底 1~2km 处，薄的