



现代海底热液 硫化物成矿地质学

李家彪 主编

非外借



科学出版社

现代海底热液硫化物成矿地质学

李家彪 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了全球海底热液硫化物资源的基本特征、分布规律、地质条件、形成机制和潜力评估,立足自主调查、集成全球数据、体现交叉研究,学科综合、系统性强、图文并茂。全书共分9章,内容涉及全球海底热液硫化物成矿系统与控制因素、从快速到超慢速四大类洋脊热液硫化物矿床、弧后盆地热液硫化物矿床、大陆裂谷环境多金属软泥,以及全球洋中脊热液硫化物资源分段潜力。

本书可供海底热液成矿理论、硫化物资源勘查和深海地质与地球物理研究等方面的科研和教学人员,以及相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代海底热液硫化物成矿地质学 / 李家彪主编. —北京: 科学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-03-055380-5

I. ①现… II. ①李… III. ①海底矿床-热液矿床-硫化物矿床-成矿地质 IV. ①P744

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 281277 号

责任编辑: 孟美岑 韩 鹏 陈姣姣 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 20 1/2

字数: 486 000

定价: 268.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编 委 会

主 编 李家彪

副主编 王叶剑 李小虎

编 委 李正刚 于志腾 牛雄伟 陈 灵 梁裕扬

曾志刚 马乐天 李洪林 王 巍 宗 统

杨 达 余 星 范维佳 王建强

序

深海是人类探索和认识自然的新领域，开发和管理自然的新疆域。深海中广大的国际管辖海域蕴藏着丰富的新型资源，是人类赖以发展的共同继承的宝藏。在众多深海资源中，海底热液硫化物作为一种重要的海洋战略矿产资源，近些年来其商业价值正逐渐被国际社会所公认，已成为大国海洋资源竞争的焦点。

自 20 世纪 70 年代末人类在东太平洋首次发现正在喷发的海底热液喷口及多金属硫化物资源之后，海底热液系统就被誉为“现代成矿的天然实验室”，受到地球科学与生物科学界的广泛关注。我国对海底热液硫化物资源的系统调查研究始于 2005 年的首次大洋环球考察，相比西方发达国家起步较晚。但经过多年的不懈努力，我国于 2011 年率先与国际海底管理局签署了西南印度洋多金属硫化物矿区勘探合同，成为世界上首个国际海底区域多金属硫化物的先驱投资者，实现了海底热液硫化物资源勘查与研究领域的跨越发展。

正是围绕全球大洋中脊持续不断的大规模深海热液硫化物找矿勘查的国家使命，催生了我国当时为数不多的自主提出的海底资源全球科学计划——“全球海底热液硫化物资源评价”重大项目，从而使我国科学家的海底科学研究从区域真正走向了全球。在这个被誉为“China RIDGE”计划的推动下，李家彪带领国家海洋局、中国科学院和高等院校等国内海底热液硫化物资源研究的优势单位的科学家，针对位于国际管辖海域近 40000 km 长的大洋中脊和弧后扩张中心区域，开展现代海底热液硫化物成矿规律的系统研究和联合攻关，取得了大量原创性成果。在此基础上，按不同构造-岩浆成矿区带，进一步开展了大洋中脊、弧后盆地热液硫化物的区域成矿学及其全球对比和资源潜力研究，编写了《现代海底热液硫化物成矿地质学》专著，深化了全球海底热液硫化物资源分布与形成机制的认识，填补了该领域的空白。同时，该书的出版，也将为我国在国际海底区域开展多金属硫化物新矿区的申请提供科学依据，推动洋壳演化、物质循环、极端生境，以及与陆地同类资源对比等重大科学问题的深化与发展。

中国工程院院士

金钊

2017 年 7 月 26 日

前 言

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。现代海底热液硫化物的发现和勘查, 已成为全球深海资源环境研究的科学前沿和热点领域。

2005 年, 在庆祝郑和下西洋 600 周年之际, 中国海洋地质学家开始思考新的科学探索方向——大洋中脊是调查最少的、全球连通的、活动的巨型海底山脉, 对发育其中的热液系统、硫化物成矿、基因资源和极端环境等问题认识十分有限, 中国科学家有可能在该领域弯道超车, 布局未来。有鉴于此, 当时唯一领导我国深海调查研究的中国大洋协会, 启动了新的研究计划“我国大洋中脊与硫化物资源综合调查研究”, 我有幸担任首席科学家亲历了我国大洋中脊研究的起步和发展。经过 10 年连续两期计划的调查研究, 我国已在全球各大洋开展工作并取得重要发现, 从而为全球各类洋中脊及其硫化物分布特征和成矿规律的综合对比研究创造了条件。

本书是项目组 10 年研究的结晶, 汇集了相关课题的成果。所涉及的资料不仅包括项目组新获取的数据, 而且还包括笔者自己的研究资料。本书第 1 章由李家彪、王叶剑、李小虎和余星共同执笔; 第 2 章由李家彪、李小虎、王叶剑和陈灵共同执笔; 第 3 章 3.1 节由李小虎和王巍执笔, 3.2 节由曾志刚和牛雄伟执笔, 3.3 节由牛雄伟执笔, 3.4~3.6 节由李小虎和李正刚执笔, 由王叶剑对部分图件进行绘制, 李家彪对各节修改成稿; 第 4 章 4.1、4.2 节由王叶剑执笔, 4.3 节由牛雄伟执笔, 4.4 节由王叶剑和宗统执笔, 4.5、4.6 节由王叶剑执笔, 李家彪对各节修改成稿; 第 5 章 5.1、5.2 节由李洪林执笔, 5.3 节由牛雄伟执笔, 5.4~5.6 节由李小虎和李正刚执笔, 李家彪对各节修改成稿; 第 6 章 6.1 节由李家彪执笔, 6.2 节由梁裕扬执笔, 6.3 节由李家彪和牛雄伟执笔, 6.4 节由陈灵执笔, 6.5 节由陈灵和李小虎执笔, 6.6 节由李小虎、王巍和王建强执笔, 李家彪对各节修改成稿; 第 7 章由李正刚执笔, 王叶剑和牛雄伟提供了部分图件, 李家彪进行了修改; 第 8 章 8.1~8.5 节由于志腾执笔, 8.6 节和 8.7 节由王叶剑、杨达和范维佳执笔, 李家彪对各节修改成稿; 第 9 章由李正刚、李小虎和王巍执笔, 余星和陈灵对部分图件进行绘制, 李家彪对各节修改成稿; 附件由马乐天和李家彪执笔。全书最后由李家彪、王叶剑和李小虎负责汇总和统稿。本书封面图片由中国大洋 38 航次第一航段科考队拍摄于西北印度洋卧蚕 1 号热液区。

感谢中国大洋矿产资源研究开发协会“多金属硫化物调查区资源评价”重大项目

(DY125-12-R) 的资助。感谢重大项目所属课题负责人初凤友研究员、韩喜球研究员无私地提供了他们主持的相关课题成果和资料。本书在编写过程中与李裕伟研究员、李文渊研究员、黄永样教授级高级工程师进行了有益的交流，在此特别表示感谢！

本书不足之处，恳请各位读者斧正。

李家彪

2017 年 7 月

于杭州西溪河畔

目 录

序 前言

第1章 绪论	1
1.1 调查历史	1
1.2 研究活动	2
1.3 数据基础	3
1.4 研究框架	5
参考文献	6
第2章 海底热液硫化物成矿系统	8
2.1 成矿构造环境	8
2.1.1 大洋中脊	8
2.1.2 弧后盆地	12
2.2 成矿物质环境	12
2.2.1 地幔部分熔融	13
2.2.2 岩浆迁移聚集	14
2.2.3 热点与洋脊相互作用	15
2.3 海底热液硫化物分布特征	16
2.3.1 海底热液喷口	16
2.3.2 海底硫化物矿床	18
2.4 海底热液硫化物成矿作用	21
2.4.1 控矿因素	21
2.4.2 成矿过程	24
2.4.3 地质模型	26
参考文献	28
第3章 快速扩张洋脊热液硫化物矿床	34
3.1 洋脊扩张	34
3.2 构造地貌	35
3.2.1 勘探者洋脊、胡安德富卡脊和戈达洋脊	35
3.2.2 加利福尼亚湾瓜伊马斯盆地	36
3.2.3 东太平洋海隆 13°N	37
3.2.4 东太平洋海隆 9°~10°N	39
3.2.5 东太平洋海隆叠接扩张中心	41
3.3 深部结构	43

3.3.1 东太平洋海隆 9°30'N	43
3.3.2 东太平洋海隆 17°S	45
3.4 岩浆作用	47
3.5 热液硫化物矿床	48
3.5.1 贫沉积物覆盖典型区硫化物矿床	48
3.5.2 沉积物覆盖典型区硫化物矿床	55
3.6 热液硫化物成矿特征	58
3.6.1 岩石和沉积物地球化学特征	58
3.6.2 硫化物矿床成矿元素分布特征	60
3.6.3 硫化物矿床成矿机制	65
参考文献	67
第4章 中速扩张洋脊热液硫化物矿床	76
4.1 洋脊扩张	76
4.2 构造地貌	77
4.2.1 中印度洋脊 23°~25°S	77
4.2.2 中印度洋脊 18°~20°S	79
4.3 深部结构	80
4.3.1 布格重力异常	80
4.3.2 地震深部探测	80
4.3.3 三维层析成像	81
4.4 岩浆作用	83
4.5 热液硫化物矿床	84
4.5.1 中印度洋脊 Kairei 热液区	86
4.5.2 中印度洋脊 Edmond 热液区	87
4.5.3 中印度洋脊 MESO 热液区	87
4.6 热液硫化物成矿特征	88
4.6.1 中印度洋脊 Kairei 热液区	88
4.6.2 中印度洋脊 Edmond 热液区	96
4.6.3 中印度洋脊 MESO 热液区	103
参考文献	105
第5章 慢速扩张洋脊热液硫化物矿床	110
5.1 洋脊扩张	110
5.2 构造地貌	113
5.2.1 大西洋中脊 13°~15°N	113
5.2.2 大西洋中脊 TAG 热液区	117
5.2.3 大西洋中脊 Rainbow 热液区	118
5.3 深部结构	119
5.3.1 大西洋中脊 35°20'N 和 23°20'N	120

5.3.2 大西洋中脊 Lucky Strike 热液区	120
5.3.3 大西洋中脊 TAG 热液区	123
5.4 岩浆作用	125
5.5 热液硫化物矿床	126
5.5.1 玄武岩型硫化物矿床	128
5.5.2 超镁铁质岩型硫化物矿床	130
5.6 热液硫化物成矿特征	134
5.6.1 典型区岩石地球化学特征	134
5.6.2 典型区元素地球化学特征	137
5.6.3 典型区硫化物矿床成矿机制	141
参考文献	144
第6章 超慢速扩张洋脊热液硫化物矿床	150
6.1 洋脊扩张	150
6.2 构造地貌	153
6.2.1 西南印度洋脊分段	153
6.2.2 岩浆段与非岩浆段	155
6.2.3 西南印度洋脊岩浆段 (49°~51°E)	157
6.2.4 西南印度洋脊非岩浆段 (61°~66°E)	160
6.3 深部结构	164
6.3.1 西南印度洋脊 50°E 地壳结构	164
6.3.2 西南印度洋脊 57°E 和 66°E 地震探测	168
6.3.3 超慢速扩张洋脊的地壳结构对比	172
6.4 岩浆作用	174
6.4.1 西南印度洋脊 49°~52°E	175
6.4.2 西南印度洋脊 61°~70°E	176
6.5 热液硫化物矿床	178
6.5.1 西南印度洋脊 49°~52°E	180
6.5.2 西南印度洋脊 61°~66°E	181
6.5.3 西南印度洋脊 10°~25°E	182
6.6 热液硫化物成矿特征	184
6.6.1 西南印度洋脊 49°~52°E	184
6.6.2 西南印度洋脊 61°~66°E	186
参考文献	190
第7章 弧后盆地热液硫化物矿床	195
7.1 构造演化	196
7.2 岩浆作用	197
7.2.1 构造作用与岩浆供给	197
7.2.2 演化趋势与演化程度	198

7.2.3 岩石类型与空间分布	199
7.3 洋内型弧后盆地热液硫化物矿床	201
7.3.1 劳盆地	201
7.3.2 马努斯盆地	207
7.3.3 硫化物矿床地球化学特征	209
7.3.4 岩浆演化及岩浆流体贡献	214
7.4 陆缘型弧后盆地热液硫化物矿床	220
7.4.1 冲绳海槽	220
7.4.2 硫化物矿床地球化学特征	224
参考文献	226
第8章 大陆裂谷环境多金属软泥	234
8.1 构造地貌	234
8.2 沉积环境	237
8.3 深部结构	238
8.3.1 反射和折射地震	238
8.3.2 重力异常	242
8.3.3 磁力异常	245
8.4 岩浆作用	245
8.4.1 溢流玄武岩	245
8.4.2 岩浆活动的深部特征	247
8.5 大陆张裂与红海演化	248
8.5.1 红海张裂	248
8.5.2 红海演化历史	251
8.6 红海 Atlantis II 深渊多金属软泥	253
8.6.1 卤水层结构	254
8.6.2 层序地层	255
8.6.3 多金属软泥成矿特征	258
8.7 红海 Atlantis II 深渊成矿机制	262
8.7.1 卤水层的金属富集过程	262
8.7.2 铁锰矿物的形成机制	264
8.7.3 硫化物与硫酸盐沉淀	264
8.7.4 微量金属元素的富集	265
参考文献	265
第9章 全球洋中脊热液硫化物资源潜力	277
9.1 成矿单元的划分原则	277
9.2 成矿单元的基础地质信息	277
9.3 成矿单元的基底岩石类型	281
9.3.1 太平洋中脊	281

9.3.2 大西洋中脊	285
9.3.3 印度洋中脊	285
9.4 各成矿单元的基底岩石成矿元素含量	287
9.5 各成矿单元的热液硫化物成矿特征	292
9.5.1 太平洋中脊	293
9.5.2 大西洋中脊	297
9.5.3 印度洋中脊	299
参考文献	300
附录 国际大洋中脊协会第三个十年科学计划 (2014 ~ 2023 年)	304

第1章 绪 论

人类社会的发展,离不开对各种资源的开发和利用。在陆地资源逐渐枯竭的今天,人们把目光投向了深海大洋。除了多金属结核和富钴结壳资源以外,深海大洋还蕴藏着丰富的热液硫化物资源。海底热液硫化物资源主要分布于大洋中脊 (Mid-Ocean Ridge)、弧后扩张中心 (Back-arc Spreading Center) 和岛弧 (Arc) 等主要区域,水深分布范围在数百米到数千米,富含 Cu、Pb、Zn、Au 和 Ag 等多种金属元素,具有矿体富集程度高、成矿快、赋存浅和易开采等特点。它不仅是 21 世纪可供人类开发的重要矿产资源,也是研究深海和地球内部各种地质、生物、化学作用,以及地质历史时期陆地上类似矿床成因和分布规律天然实验室。

1.1 调查历史

1972 年美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 执行 TAG (Trans-Atlantic Geotraverse) 计划时,在大西洋中脊 (Mid-Atlantic Ridge, MAR) 发现了第一个热液区,并命名为 TAG 热液区 (Scott *et al.*, 1974)。1977 年,美国科学家乘坐“Alvin”号载人深潜器在东太平洋加拉帕戈斯 (Galapagos) 扩张中心首次发现了海底热泉和热液生物群落 (Corliss *et al.*, 1979)。1978 年,由法国、美国、墨西哥科学家组成的考察队利用法国“Cyana”号载人深潜器在东太平洋海隆 (East Pacific Rise, EPR) 21°N 首次发现海底热液硫化物 (Francheteau *et al.*, 1979; Hékinian *et al.*, 1980), 直接观察到了硫化物丘状体。1979 年,“Alvin”号载人深潜器在东太平洋海隆 21°N 再度下潜,发现此处喷出的热液温度高达 350°C (Spiess *et al.*, 1980)。这些活动正式拉开了人类对海底热液系统及其硫化物与生物资源调查研究的序幕。

之后,以美国 Peter Rona 博士为首的科学家,迅速开展了东太平洋海隆 (13°S ~ 21°N) 和中大西洋脊 (26°S ~ 23°N) 区域的海底热液活动调查。法国国家海洋勘探开发研究院 (IFREMER) 的科学家在加强东太平洋和中大西洋部分海域调查的同时,还进军西南太平洋,并取得了重大进展。德国科学家虽然起步较晚,但是后来者居上,与法国和日本科学家在西南太平洋岛弧和弧后盆地 (Back-Arc Basin) 发现了多处海底热液活动和硫化物矿床。日本地学界以浦边徹郎 (Tetsuro Urabe) 博士为首的科学家立足西南太平洋并取得突破后,又转战太平洋超快速扩张脊,1995 年发现全球最大的热液羽状流 (Urabe *et al.*, 1995)。2000 年,日本科学家在中印度洋脊 (Central Indian Ridge, CIR) 发现了 Kairei 热液区 (Hashimoto *et al.*, 2001)。俄罗斯科学家在大西洋中脊长期调查中发现了多处热液区,包括 1993 年发现的 Logatchev 热液区 (Batuyev *et al.*, 1994), 2003 年发现的 Ashadze 热液区 (Bel'Tenev *et al.*, 2004), 2007 年发现的 Semenov 热液区 (Bel'Tenev *et al.*, 2009), 2008 年发现的 Zenit-Victory 热液区 (Cherkashov *et al.*, 2008)。2004 年美国和日本科学

家合作,使用水下自主机器人 (ABE) 等设备在东劳盆地 (East Lau Basin) 扩张中心发现了四处新的热液喷口分布区 (German *et al.*, 2006)。2005 ~ 2009 年德国和英国的科学家合作,在南大西洋脊 (South Mid-Atlantic Ridge) 5°S 和 9°S 附近发现了 Turtle Pits、Red Lion 和 Liliput 三处新的热液区 (Haase *et al.*, 2007, 2009)。2006 年德国、美国、英国和新西兰的科学家合作,在南大西洋脊 8°S 附近证实了 Nibelungen 热液区的存在 (Melchert *et al.*, 2008)。

除美国、英国、日本、德国、法国、俄罗斯等国家长期持续地对海底热液硫化物资源进行调查研究外,大型矿业公司如加拿大的鹦鹉螺矿业公司 (Nautilus Minerals Niugini Limited)、美国的海王星矿业公司 (Neptune Minerals Inc.) 和沙特阿拉伯的马纳法国际贸易公司 (Al Manafa Group) 已经分别着手对西太平洋巴布亚新几内亚、新西兰领海和红海的多金属硫化物和多金属软泥矿床进行商业性勘查活动 (Petersen *et al.*, 2016)。

我国对热液硫化物的调查和研究起步较晚,1988 年中德合作“SO-57 航次”对马里亚纳 (Mariana) 海槽区热液硫化物的分布情况和形成机理进行了调查研究。1992 年在国家自然科学基金委员会的支持下,中国科学院海洋研究所对冲绳海槽热液活动区进行了调查采样。2003 年由中国大洋矿产资源研究开发协会 (以下简称大洋协会) 组织的大洋航次首次在东太平洋海隆 13°N 附近用拖网获得了少量的热液产物。2005 年大洋协会组织了我国首次针对大洋中脊的环球科学考察,对东太平洋海隆、大西洋中脊和印度洋中脊的重点海域进行了热液硫化物资源探查,在三大洋中脊的一些已知热液活动区中获取了大量热液硫化物、围岩和沉积物等地质样品,采集了地球物理资料,并在东太平洋海隆和印度洋中脊发现了一些新的热液异常区。2007 年大洋协会在环球航次调查成果基础上,再次对印度洋中脊进行了调查,在西南印度洋脊 (Southwest Indian Ridge, SWIR) 49°39'E 首次发现海底黑烟囱并取得了热液硫化物样品,这也是世界上首次在超慢速扩张洋中脊发现正在活动的海底热液区 (Tao *et al.*, 2012)。至今,经过短短的 10 多年时间,我国已经在东太平洋海隆、大西洋中脊和印度洋中脊先后发现了 42 处热液区 (中国大洋矿产资源研究开发协会办公室, 2016), 约占全球海底热液系统总发现量的 8%。

除大洋中脊区域以外,位于各国专属经济区范围内的弧后盆地也蕴藏着丰富的热液硫化物资源,而且由于其特殊的成矿环境,所产出的热液硫化物资源一般富含 Au、Ag 和 Pb 等金属元素,加上水深较浅、邻近大陆,是热液硫化物资源开发利用的理想区域。

2010 年 5 月,国际海底管理局《“区域”多金属硫化物资源勘探与探矿规章》(以下简称《勘探规章》) 获得通过,我国率先提交了西南印度洋硫化物资源勘探区申请,成为国际上海底硫化物资源调查的后起之秀。继中国递交了勘探区申请几个月之后,俄罗斯也提交了北大西洋多金属硫化物勘探区的申请。截至 2016 年 4 月,已有中国、俄罗斯、法国、德国、韩国和印度 6 个国家取得了国际海底管理局核准的多金属硫化物勘探申请。全球多金属硫化物成矿规律、勘探区遴选、资源环境的研究与评价,既是科学前沿,又关乎国家利益,是未来深海研究的热点方向和前沿领域。

1.2 研究活动

1979 年,关于海底热液硫化物的研究论文“Massive deep-sea sulphide ore deposits

discovered on the East Pacific Ridge” 发表于 *Nature* 杂志 (Francheteau *et al.*, 1979), 从此开启了一个全新的研究领域。为阐述海底热液、岩浆、构造活动及其硫化物成矿这一主题的研究历史, 项目组开展了以国际海底区域为重点的全球文献统计分析, 其中涉及北大西洋脊、东太平洋海隆、中印度洋脊和西太平洋弧后地区等全球海底热液硫化物主要分布区域。使用 Elsevier、Springer Link、AGU、CNKI 和 GSW 等主要文献数据库进行检索, 通过 Note Express 和 Endnote 文献管理软件编辑和分析, 最终确定硫化物相关文献 2000 余篇, 文献时间跨度为 1959 ~ 2014 年, 主要发表在 *Geology*、*Economic Geology*、*Ore Geology Reviews*、*Chemical Geology*、*Geochemistry Geophysics Geosystems*、*Journal of Geophysical Research*、*Earth and Planetary Science Letters*、*Geochimica et Cosmochimica Acta* 和 *Marine Geology* 等国际期刊。

按年度对文献进行统计发现, 从 20 世纪 70 年代以来, 围绕海底热液硫化物的研究论文数量逐渐增加。特别是近 20 年以来, 热液硫化物的研究成为热点, 研究成果大幅上升 (图 1-1)。从区域上看, 太平洋硫化物研究程度相对较高, 文献占到 60%, 大西洋次之, 印度洋的研究程度最低, 只占到 5%。

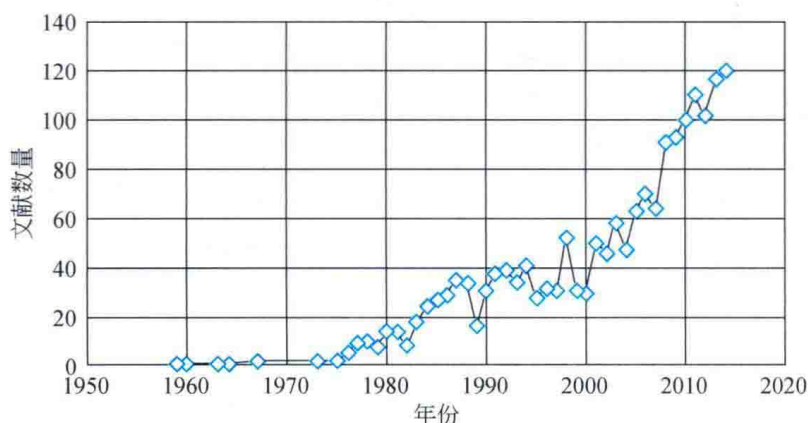


图 1-1 1959 ~ 2014 年各年度的海底热液硫化物/多金属软泥等相关文献统计

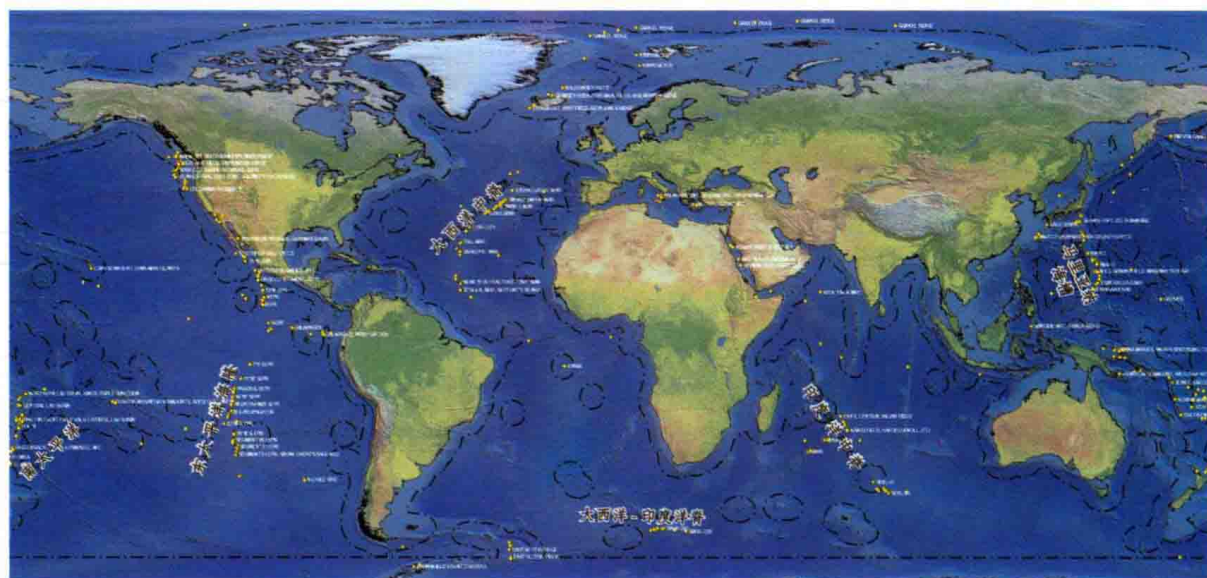
按航次年份对全球大洋科学考察航次调查数据统计发现, 全球海洋调查工作的 90% 以上是在 20 世纪 60 ~ 90 年代完成的, 70 ~ 80 年代处于高峰阶段。而到了 21 世纪初, 大洋调查呈现放缓趋势, 但这仅仅反映西方发达国家的调查活动情况。由于某些原因, 俄罗斯和中国航次数据没有公开, 而这一时期中俄两国是全球硫化物调查较活跃的国家。按区域来分, 太平洋区有 3092 个航次, 大西洋区有 2056 个航次, 印度洋区最少, 只有 749 个航次, 这在一定程度上反映了全球硫化物相关调查活动在全球不同洋区分布的差异。

1.3 数据基础

为阐明全球海底热液硫化物成矿环境、分布规律和控矿因素, 对全球不同洋区海底地形、重力、磁力、沉积物、岩石、矿物、岩浆、构造及调查测站测线等信息进行了系统收集和整理。目前涉及全球海底资源相关的公开数据库达 50 多个, 其中最主要的有国际海

底管理局 (ISA)、国际大洋中脊协会 (InterRidge)、海底岩石地球化学数据库 (PetDB)、海洋和陆地岩石地球化学数据库 (GEOROC)、综合大洋钻探计划 (IODP)、美国国家海洋和大气管理局 (NOAA)、美国国家地球物理数据中心 (NGDC)、美国海洋地质数据系统 (MGDS)、美国伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI)、美国斯克里普斯海洋研究所 (SIO)、英国国家海洋研究中心 (NOC)、英国海洋数据中心 (BODC)、德国亥姆霍兹基尔海洋研究中心 (GEOMAR)、德国联邦地学与自然资源研究院 (BGR)、德国亥姆霍兹极地海洋研究中心 (AWI)、法国海洋开发研究院 (IFREMER)、日本海洋科学技术中心数据库 (DARWIN)、日本国际海洋情报中心 (GODAC)、印度国家海洋研究所 (NIO)、澳大利亚地球科学组织 (GA) 和澳大利亚联邦科学与工业组织 (CSIRO) 等。使用公开数据库客户端软件 GeoMapApp、Virtual Ocean 进行了系统校验, 剔除部分错误数据, 补充学术文献数据并进行矢量化分类处理, 构建了全球海底热液硫化物数据库。其中, 全球热液硫化物数据库主要包括国际海底管理局、国际大洋中脊协会、鸚鵡螺矿业公司的钻孔数据和 GeoMapApp 数据库以及部分来自美国 Ridge 2000 项目、国际文献和航次报告的数据。共记录了大西洋、太平洋、印度洋、地中海、红海等地的海底热液系统及相关的矿床, 共 1015 个点位数据, 554 个热液喷口数据。

ISA 的全球海底硫化物数据 (图 1-2): 主要包括硫化物采样点、样品编号、分析方法、金属含量 (Au、Ag、Co、Ni、Cu、Pb、Zn 和 Fe)、样品类型、描述、矿物组成、采样位置、位置经纬度、水深和参考文献 11 项内容。区域分布在太平洋中脊、大西洋中脊、太平洋岛弧及弧后盆地、印度洋中脊、地中海和红海; 还包含东太平洋海隆、大西洋中脊



注:
本图所标注的多金属硫化物矿床及热液喷口位置来自于ISA和InterRidge数据库,
空白区域不代表该区不存在热液喷口和矿床

图 例

◆ 热液喷口/硫化物
采样位置
○ 专属经济区
界限
数据来源: ISA, NOAA, InterRidge
海洋划界数据: GDAIS(1999年至今)

图 1-2 全球海底热液喷口研究区分布 (据 ISA 官方网站^①修改)

① <https://www.isa.org.jm>.

和印度洋中脊三大洋区 20 个单个喷口硫化物完整数据, 可用于全球典型硫化物主要金属元素分析统计。

GeoMap App 客户端由哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球观测站 (Lamont-Doherty Earth Observatory, LDEO) 海洋地球科学数据系统支持, 可以用来浏览全球海洋地形数据和其他类型数据, 包括海底地震、热流、沉积物、岩石、海底火山等, 还链接了 NGDC、Ridge 2000 等多个数据库的入口, 并可以进行查询和下载。GeoMap App 热液喷口和硫化物相关数据, 包括全球热液喷口点分布、全球海地板块边界、全球海底热流等全球背景数据, 以及 EPR 9°N 所有喷口点位置分布、岩石样品采样站位、流体样品采样站位、生物样品采样站位、火山玻璃采样站位和岩石化学数据。

世界上已有加拿大的鹦鹉螺矿业公司等正在积极勘探离大陆较近、水深较浅的弧后盆地区域的海底块状硫化物矿床, 探索性开采使得水深在 2000 m 以上的马努斯 (Manus) 盆地的海底硫化物及 Au 等资源的开发成为现实。本书也收集了来自鹦鹉螺矿业公司研究区技术报告^① (2010 ~ 2012 年) 中的大量钻孔和硫化物金属含量数据。

1.4 研究框架

从 20 世纪 70 年代开始, 国际上对深海热液活动这一新兴研究领域注入了极大的热情, 开展了以海底热液地质过程认知、热液硫化物资源和生物基因资源发现和研究为目的的综合调查研究。国际大洋中脊协会第二个十年计划 (2004 ~ 2013 年) 建议全球科学家加强超慢速扩张洋脊、洋脊-热点相互作用、弧后扩张系统、大洋中脊的生态系统、海底监测与观察、地球深部取样和全球性调查等领域的联合研究。

我国从 2005 年开始了全球洋中脊的科学调查研究, 在西南印度洋脊、南大西洋脊、西北印度洋卡尔斯伯格脊 (Carlsberg Ridge) 和东太平洋海隆等区域开展了以多金属硫化物探矿为主要目标的综合调查, 为全球海底多金属热液硫化物成矿规律与资源评价奠定了重要基础。本书在中国大洋“十二五”重大项目“多金属硫化物调查区资源评价”及其相关课题研究的基础上进行了综合集成, 主要研究内容包括以下四个方面。

1) 大洋中脊热液硫化物区域成矿学

开展全球不同扩张速率 (快速、中速、慢速、超慢速) 洋脊热液硫化物成矿特征与成矿条件分析。重点对我国在快速扩张的东太平洋海隆、中速扩张的中印度洋脊、慢速扩张的卡尔斯伯格脊和南大西洋脊及超慢速扩张的西南印度洋脊 5 个区域获得的调查研究成果进行集成分析, 总结分析上述区域洋中脊的扩张机制、构造地貌、深部结构、岩浆作用, 以及热液硫化物矿床的分布规律和成矿机理, 从区域典型矿床地质出发, 建立成矿地质模型, 评估成矿潜力。

2) 大陆边缘热液硫化物 (软泥) 区域成矿学

弧后盆地和大陆裂谷分别是大陆边缘汇聚和离散边界的代表, 也是海底热液硫化物和多金属软泥产出的重要区域。开展岛弧后盆地和大陆裂谷地形地貌、沉积环境、岩浆作

^① Nautilus Minerals INC. AIM Admission, 168-218.