

太平洋多金属结核和富钴结壳 地质地球化学特征与成矿机制对比

何高文 孙晓明 薛 婷 著

TAIPINGYANG DUOJINSHU JIEHE
HE FUGU JIEQIAO DIZHI DIQIU HUAXUE TEZHENG YU
CHENGKUANG JIZHI DUIBI

地质出版社

国家自然科学基金和国际海底区域研究开发项目资助

太平洋多金属结核和富钴 结壳地质地球化学特征 与成矿机制对比

何高文 孙晓明 薛 婷 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

多金属结核和富钴结壳是两种重要的海底固体矿产,前者富含 Mn、Co、Ni、Cu 等金属元素,后者富含 Co、稀土(REE)、Pt 等金属元素,是潜在的战略资源。它们在结构构造、矿物组成、主要金属组分等方面具有一定的相似性,但也存在很大的差别。本书利用我国近 10 年来 7 个大洋航次的实际调查资料 and 以往资料,采用显微镜观察、X 射线衍射分析、同步辐射 X 射线光发射显微镜(SR-XPEEM)分析、高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)分析、红外光谱分析、穆斯堡尔谱分析、X 射线荧光光谱分析、ICP-MS、铀试金法富集 PGE、高真空气体同位素质谱分析、气体吸附多孔结构分析等较为先进的岩矿测试方法,通过对结核和结壳产出的地质背景、海洋环境、矿物组成、地球化学特征等诸方面的系统对比,探讨了结核和结壳物质来源、成矿环境的差异,根据结核和结壳中锰铁矿物的纳米特性,认为除化学成矿作用、有机成矿作用和生物成矿作用外,纳米成矿作用是结核和结壳中微量元素超常富集的重要原因,综合多种因素,提出了结核和结壳二阶段成矿模式。

本书可供从事矿物学、岩石学和矿床学,特别是海洋矿产资源教学和科研人员及相关专业研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

太平洋多金属结核和富钴结壳地质地球化学特征与成
矿机制对比/何高文,孙晓明,薛婷著. —北京:地
质出版社,2011.6

ISBN 978-7-116-07202-2

I. ①太… II. ①何…②孙…③薛… III. ①太平洋
—海底矿物资源—多金属矿床—海洋地球化学②太平洋—
海底矿物资源—多金属矿床—成矿作用 IV. ①P736.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 073143 号

责任编辑:赵俊磊 蔡卫东

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324571(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:11.25 图 版:4

字 数:260 千字

印 数:1—600 册

版 次:2011 年 6 月北京第 1 版

印 次:2011 年 6 月北京第 1 次印刷

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07202-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

多金属结核和富钴结壳是两种重要的海底固体矿产，前者富含 Mn, Co, Ni, Cu 等金属元素，后者富含 Co, 稀土 (REE), Pt 等金属元素，是潜在的战略资源。

科学界对多金属结核的大规模调查研究始于 20 世纪 60 年代，对富钴结壳的调查研究热潮始于 20 世纪 80 年代。由于深海矿业前景不明朗，20 世纪 90 年代以来，针对多金属结核和富钴结壳的资源调查与评价工作虽有所减少，但科学研究工作并没有停止。近年来，随着国际海底管理局关于多金属硫化物和富钴结壳勘探规章的审议和出台，包括俄罗斯、日本、韩国、中国、法国等在内的深海探测活动较为活跃的国家加大了深海矿产资源调查工作的力度。

历经数十年的调查与研究，国际上关于多金属结核和富钴结壳的研究成果非常丰富，我国自 20 世纪 80 年代开展多金属结核调查以来，至今已近 30 年，也积累了大量资料。本书主要以广州海洋地质调查局和中国大洋协会近 10 年来 7 个大洋航次在太平洋多金属结核和富钴结壳调查区采集的样品与资料为基础，利用包括显微镜观察、X 射线衍射分析、同步辐射 X 射线光发射显微镜 (SR-XPEEM) 分析、高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 分析、红外光谱分析、穆斯堡尔谱分析、X 射线荧光光谱分析、ICP-MS、铈试金法富集 PGE、高真空气体同位素质谱分析、气体吸附多孔结构分析等在内的当代先进的岩矿测试方法，开展研究，并通过对结核和结壳产出的地质背景、海洋环境、矿物组成、地球化学特征等诸方面的系统对比，尤其是系统进行结核与结壳之间铂族元素和稀有气体特征的对比，探讨了结核和结壳物质来源、成矿环境的差异，确定了组成结核和结壳的锰铁矿物的纳米属性和主要成矿元素的赋存状态，并根据结核和结壳中锰铁矿物的纳米特性，认为除化学成矿作用、有机成矿作用和生物成矿作用外，纳米成矿作用是结核和结壳中微量元素超常富集的重要原因，综合多种因素，提出了结核和结壳二阶段成矿模式。

本书研究工作得到中国大洋协会国际海底区域研究开发“十五”计划 DY105-01-02-1, DY105-01-01-1 和 DY105-02-01-13 课题、国家自然科学基金 (编号: 40343019, 40473024)、高等学校博士点基金 (编号: 20040558049)、教育部跨世纪优秀人才培养计划基金和中国科学院广州地球

化学研究所、南海海洋研究所边缘海地质重点实验室开放基金（编号：MSG-L-CAS03-4）联合资助。

在本书出版之际，谨向对研究工作提出宝贵意见的谢先德研究员、李兆麟教授、彭明生教授、顾连兴教授、周怀阳教授、牛贺才研究员、黄永样教授、刘春莲教授、陈炳辉教授表示衷心感谢，向在工作中提供帮助的广州海洋地质调查局杨胜雄总工、朱克超教授级高工、张学华高工、宋成兵工程师、郭丽华高工、中国大洋协会周宁研究员、田赤英研究员、美国威斯康星大学的 Huifang Xu 博士等谨致谢忱！

由于学识所限和认识局限，本书不当或错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 9 月于广州

目 录

前 言

1 绪论	(1)
2 研究区地质概况及结核和结壳区地质背景对比	(6)
2.1 研究区位置与区域地形	(6)
2.2 区域构造	(14)
2.3 区域地层与火山活动	(22)
2.4 研究区表层沉积物和基岩	(26)
2.5 小结	(36)
3 研究区海洋环境和海洋化学	(39)
3.1 水柱海洋化学	(39)
3.2 最低含氧带	(45)
3.3 碳酸盐补偿深度	(51)
3.4 叶绿素 a 和初级生产力	(52)
3.5 底层海流	(55)
3.6 小结	(60)
4 多金属结核和富钴结壳矿物学和地球化学特征对比	(62)
4.1 类型划分、结构构造及物性特征	(62)
4.2 矿物组成	(64)
4.3 化学组成与元素地球化学	(67)
4.4 生长速率与年代	(112)
4.5 小结	(119)
5 多金属结核与富钴结壳中主要矿物纳米属性的确定	(122)
5.1 纳米物质及其效应	(122)
5.2 结核和结壳 Mn、Fe 矿物特性	(123)
5.3 研究和分析方法	(125)
5.4 BET 比表面积和 BJH 孔径测定	(126)
5.5 高分辨率透射电镜 (HRTEM) 观测	(133)
5.6 小结	(133)
6 富钴结壳主要成矿元素赋存状态	(134)
6.1 元素赋存状态研究方法	(134)
6.2 同步辐射 X 射线光发射显微镜 (SR-XPEEM) 实验条件和原理	(135)
6.3 锰的晶体化学和主要 (氢) 氧化物	(137)
6.4 [Mn] 赋存状态及 $L_{2,3}$ 能量	(137)

6.5	[Fe]赋存状态及 $L_{2,3}$ 能量	(138)
6.6	[Co]赋存状态及 $L_{2,3}$ 能量	(139)
6.7	[Ca]赋存状态及 $L_{2,3}$ 能量	(139)
6.8	小结	(140)
7	多金属结核和富钴结壳成矿元素富集机制	(141)
7.1	成矿物质来源	(141)
7.2	成矿环境	(143)
7.3	化学成矿作用	(146)
7.4	生物和有机成矿作用	(149)
7.5	纳米成矿作用	(149)
7.6	结核和结壳成矿模型	(149)
8	主要结论	(152)
	参考文献	(154)
	中文摘要	(163)
	英文摘要	(166)
	图版说明及图版	(170)

Contents

Preface

1	Introduction	(1)
2	Geological Setting of Working Areas and Comparisons of Geological Background between Polymetallic Nodules and Cobalt-rich Crusts	(6)
2.1	Location and regional topography of working areas	(6)
2.2	Regional structures	(14)
2.3	Regional strata and volcanic activities	(22)
2.4	Surficial deposits and bedrocks in working areas	(26)
2.5	Summary	(36)
3	Marine Environment and Chemistry in Working Areas	(39)
3.1	Marine chemistry in seawater column	(39)
3.2	Oxygen minimum zone (OMZ)	(45)
3.3	Carbonate compensation depth (CCD)	(51)
3.4	Chlorophyll a and primary productivity	(52)
3.5	Bottom currents	(55)
3.6	Summary	(60)
4	Mineralogical and Geochemical Comparisons between Polymetallic Nodules and Cobalt-rich Crusts	(62)
4.1	Classification, textures and physical characteristics	(62)
4.2	Mineralogical compositions	(64)
4.3	Chemical compositions and trace geochemistry	(67)
4.4	Growth rate and chronology	(112)
4.5	Summary	(119)
5	Nano-scale Characteristic of Composed Minerals in Polymetallic Nodules and Cobalt-rich Crusts	(122)
5.1	Nano-scale materials and nano effects	(122)
5.2	Mineralogical characteristics of Mn and Fe minerals in polymetallic nodules and cobalt-rich crusts	(123)
5.3	Analytical methods	(125)
5.4	Measurements of BET surface areas and BJH pore sizes	(126)
5.5	Observation and measurement under high resolution transmission electron microscopy (HRTEM)	(133)
5.6	Summary	(133)

6	Occurrence of Major Ore-forming Elements in Cobalt-rich Crusts	(134)
6.1	Analytical methods in element occurrence	(134)
6.2	Experimental conditions and principal for Synchrotron radiation based X ray photo emission electron microscopy (SR-XPEEM)	(135)
6.3	Manganese crystal chemistry and major (hydro) oxides	(137)
6.4	Occurrences and $L_{2,3}$ energy of manganese	(137)
6.5	Occurrences and $L_{2,3}$ energy of iron	(138)
6.6	Occurrences and $L_{2,3}$ energy of cobalt	(139)
6.7	Occurrences and $L_{2,3}$ energy of calcium	(139)
6.8	Summary	(140)
7	Enrichment Mechanism of Ore-forming Elements in Polymetallic Nodules and Cobalt-rich Crusts	(141)
7.1	Source of ore-forming elements	(141)
7.2	Metallogenic environment	(143)
7.3	Chemical mineralization	(146)
7.4	Biom mineralization and organic mineralization	(149)
7.5	Nano-mineralization	(149)
7.6	Metallogenic model of polymetallic nodules and cobalt-rich crusts	(149)
8	Conclusions	(152)
	References	(154)
	Abstract (in Chinese)	(163)
	Abstract (in English)	(166)
	Plate Explanations and Plates	(170)

1 绪 论

占地球表面 71% 的海洋蕴藏着丰富的矿产资源，其中多金属结核和富钴结壳是两种重要的海底固体矿产，前者富含 Mn, Co, Ni, Cu 等金属元素，后者富含 Co, 稀土 (REE), Pt 等金属元素，是潜在的战略资源。随着陆地矿产资源的日益枯竭，海底资源逐渐吸引了世人的目光。

多金属结核和富钴结壳在结构构造、矿物组成、主要金属组分等方面具有一定的相似性，但也存在很大的差别。例如，在矿物成分方面，结核含有水羟锰矿、钙锰矿、针铁矿、纤铁矿等，而结壳则以水羟锰矿为主，且结壳中矿物的结晶程度明显较低；在赋存部位方面，结核产于深海平原的松软沉积物表层，而结壳则产于硬质基底的海山岩石之上；在金属组分方面，结核 Ni, Cu 含量较高，而结壳富含 Co, Pt, REE, 等等。但目前，结核和结壳之间的差异性系统研究鲜见报道。

开展多金属结核和富钴结壳成矿机制的对比研究，不仅可以揭示现代和地质历史时期海底极端环境下成矿作用过程，探索自然奥秘，回答科学问题，具有重要的科学意义，而且可以为结核和结壳的分布规律研究提供理论依据，进而科学指导找矿，具有现实的政治和经济意义。

多金属结核因其富含 Mn, Cu, Co, Ni 等多种金属而得名，曾被称作铁锰结核或锰结核。它们呈大小不等 (1 ~ 15 cm) 的球形状、不规则状，广泛分布于太平洋、印度洋和大西洋等洋盆的沉积物表层，其中以东太平洋的 CC 区 (克拉里昂断裂带与克里帕顿断裂带之间的区域) 最为富集且最具潜在经济价值 (图 1.1)。

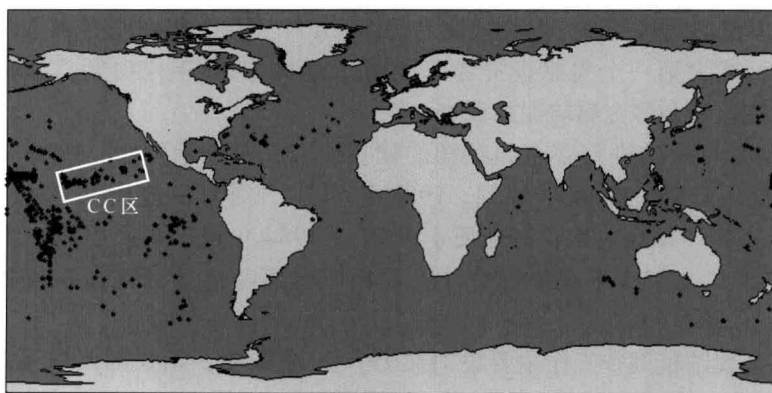


图 1.1 全球大洋多金属结核采样分布图
(据 www.isba.org.jm, 2006)

多金属结核最早于 19 世纪后期 (1868 年) 在西伯利亚岸外的北冰洋喀拉海 (Kara Sea) 中发现。但人类第一次真正认识多金属结核应当始于英国“挑战者”号进行环球考

察期间 (1872 ~ 1876 年), 于 1873 年 2 月 18 日在大西洋加那利群岛 (Canary Islands) 的法劳 (Ferro) 岛西南 300 km 处水深 4360 m 的海底采集到的多金属结核^①, 随后, “挑战者”号发现世界大多数海洋都存在多金属结核。此后, 美国 “信天翁”号调查船于 20 世纪初 (1899 ~ 1900 年和 1904 ~ 1905 年) 对太平洋的多金属结核开展调查, 并初步绘制了太平洋东南部的多金属结核分布图。由于技术手段所限, 在此后的近半个多世纪时间里, 多金属结核的调查研究未有明显进展。直到 20 世纪 60 年代, Merro (1965) 指出其经济价值后, 才引起国际关注, 美国、苏联、德国、法国、日本等国相继开展了大规模的调查。从 1983 年开始, 苏联 (现俄罗斯)、日本、法国、印度、中国、海金联 (由东欧几个原社会主义国家组成的联合组织)、韩国等先后在国际海底管理局登记为先驱投资者, 在国际海底获得了多金属结核开辟区, 并先后与国际海底管理局签订了 “勘探合同”; 德国于 2005 年提出勘探区申请, 2006 年签订 “勘探合同” (据 www.isba.org.jm)。

美国是最早开展多金属结核调查研究的国家之一, 自 20 世纪 60 年代以来, 对多金属结核进行了大量的研究, 从事此项工作的机构主要有美国地质调查所 (USGS)、Scripts 海洋研究所、Lamont - Doherty 地质观测所、Kenecott 财团、深海探险公司、海洋管理公司、海洋矿物公司等。美国 25 所大学在 1970 ~ 1980 年期间开展 “大学间锰结核研究计划”, 1975 ~ 1976 年美国海洋大气局开展 “深海采矿环境研究 (DOMES)” 计划, 1978 年美国哥伦比亚大学 Lamont-Doherty 地质观测所编制了洋底沉积物和多金属结核分布图。此外, 从 1968 年开始执行的 DSDP 计划及后来的 ODP 计划, 在太平洋实施了近 50 个钻孔, 为多金属结核和结壳的研究提供了宝贵的基础资料。以美国为主的多个国际财团, 在东太平洋 CC 区圈定了多块富矿区。美国对多金属结核的调查工作已基本结束, 重点转向海山区的富钴结壳和洋中脊及弧后裂谷的海底热液硫化物调查。

苏联是开展深海矿产资源调查起步较早的国家, 对太平洋、大西洋、印度洋开展了广泛的调查。1956 ~ 1958 年在太平洋中部和北部调查, 编制了太平洋多金属结核分布图, 1977 年起开展赤道以北太平洋多个区块的调查研究, 1980 年开始在东太平洋 CC 区开展网度为 7.5' × 7.5' 的测站调查, 共完成测站 5000 余个。1983 年向联合国国际海底管理局提出矿区申请, 成为第一个先驱投资者申请国。20 世纪 80 年代中期, 苏联转向富钴结壳、海底热液硫化物和多金属软泥的调查。

日本从 1968 年开始进行多金属结核的调查研究, 至今未停止。1970 ~ 1971 年实施 “深海矿物资源开发基础研究” 计划, 1972 年实施 “深海矿物资源基础研究” 计划, 1979 ~ 1983 年实施 “深海矿物资源地质学研究”。1984 年提出矿区申请, 1987 年获得批准。从 1985 年起, 与南太平洋岛国合作开展岛国专属经济区内铁锰矿床和热液硫化物调查。

法国的多金属结核调查工作主要集中在 1970 ~ 1978 年, 调查区以法属波利尼西亚海域和东太平洋 CC 区为主。1987 年成为先驱投资者。

印度也是多金属结核研究开发活动最为积极的国家之一, 到目前为止, 已完成多金属结核综合研究计划、技术经济评价和综合开发研究工作。经联合国国际海底管理局批准, 印度于 1987 年在印度洋中央海盆获得先驱投资者开辟区。

① 萧汉强等, 深海采矿前景预测, 大洋多金属结核开发战略和法规研究专题之七, 1995。

韩国、海金联也于 20 世纪 80 年代开展多金属结核调查，并在 CC 区获得开辟区。

富钴结壳是继多金属结核之后，人们发现的又一重要的深海固体矿产资源，它广泛分布于海山上（图 1.2）。由于富钴结壳分布区水深较浅，其钴含量特别丰富，具有重要的经济价值，因此成为发达国家竞相争夺的对象。

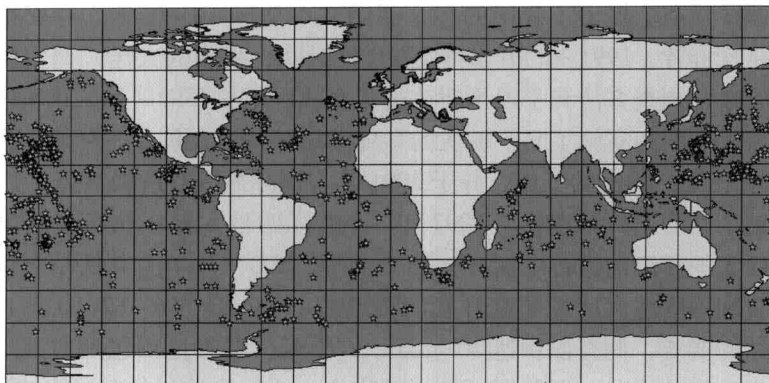


图 1.2 全球大洋富钴结壳采样分布图

（据 www.isba.org.jm, 2006）

对富钴结壳的大规模调查始于 20 世纪 80 年代^①。其中德国率先在 1981 年对中太平洋的富钴结壳进行了航次调查，1984 ~ 1986 年相继又在中太平洋的专属经济区进行勘查研究，尔后与美国合作共同开展该项工作。1983 年起美国也积极参与了富钴结壳的调查研究，美国地调局、美国矿管局、美国国家海洋大气局等单位不惜花费数亿美元之巨资，对其专属经济区、托管领地及其周围的国际海域进行了十多次航次调查，20 世纪 90 年代初已初步完成夏威夷富钴结壳的开采、运输、冶炼及加工等各项准备工作，目前仍在继续深入开展此项工作。1982 年起，日本海洋开发公司、日本地调局、东京大学海洋研究所等单位组织实施对西太平洋富钴结壳进行勘查和研究。目前，日本正积极开发研究富钴结壳的开采技术，并计划在西太平洋海域进行试采。俄罗斯从 1986 年将海洋矿产资源勘查重点由大洋多金属结核转向富钴结壳，至 1996 年已完成了西太平洋国际海域共 24 个航次的调查研究，其投入费用之多，调查范围之广，研究之深为其他国家少有。现在俄罗斯已初步完成位于国际海域两个富钴结壳矿床的详查工作，并做好准备向国际海底管理局提交作为勘探区的申请。法国从 20 世纪 80 年代初也从多金属结核调查转向富钴结壳调查。韩国于 1989 ~ 1991 年，与美国合作，在西太平洋海域开展了 3 个航次的调查研究，现正积极组织力量，准备着手独立开展此项工作。

与发达国家相比，我国的大洋矿产资源调查工作起步较晚，总体落后 10 ~ 20 年。20 世纪 60 年代初，我国已注意到多金属结核资源的潜在经济价值和科学意义，70 年代中期，我国调查船在大洋科学考察时在太平洋中部采集到结核，并进行了相关研究。正式调

^① Hein J. Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin and research activities. Proceedings of the International Seabed Authority Workshop held on 26 ~ 30 June 2000 in Kingston, Jamaica, International Seabed Authority, 2000.

查始于 20 世纪 80 年代中期, 1985 ~ 1990 年国家海洋局“向阳红 16 号”船, 在中太平洋和东太平洋海盆进行了 4 个航次多金属结核调查; 1986 ~ 1989 年, 地质矿产部“海洋四号”船在中太平洋和东太平洋 CC 区进行了 4 个航次调查, 取得了一大批成果(许东禹等, 1994a)。在这 8 个航次工作基础上, 1990 年中国大洋矿产资源研究开发协会向联合国国际海底管理局筹委会提出了我国的多金属结核申请区, 1991 年 3 月获得批准, 中国成为第五个先驱投资者。1991 ~ 2001 年的近 10 年时间, 我国的大洋矿产资源调查工作蓬勃开展, 卓有成效, 调查方法和手段不断改进, 对我国结核开辟区的认识不断深入, 取得了许多重要成果。这期间实施了 9 个航次的多金属结核调查, 按照国际海底管理局勘探规章的要求, 按时完成了 50% 的工作, 并于 2001 年与国际海底管理局签订了“勘探合同”。

我国对富钴结壳的正式调查始于 1997 年, “海洋四号”船在执行多金属结核调查任务的同时, 对西太平洋海山进行了探查(何高文等, 2001)。大力开展结壳调查, 并圈定申请矿区, 是我国国际海底区域研究开发的重点之一。迄今为止(2010 年), 已在 16 个航次中安排了结壳调查, 调查面积达 20 余万平方千米, 调查范围包括西太平洋和中太平洋。在进行调查工作的同时, 还开展了结壳矿物学、地球化学和分布规律的研究。

30 多年来, 随着科学技术的进步, 人们对海底多金属结核和富钴结壳的认识不断深入。通过调查研究, 国内外学者对结核的形态、结构构造、矿物组成、地球化学特征、生长机制、分布规律等方面进行了较为系统的研究和论述。

在内部结构构造方面, 利用电子显微镜和电子探针技术, 揭示了结核、结壳内部的纹层、斑杂、柱状、叠层、同心圆等显微构造, 并提出了构造层组、生物构造等概念(梁德华, 1992; 许东禹等, 1994; 陈圣源等, 1997; 何高文等, 2001; 朱克超等, 2001)。

在成分研究方面, 利用 X 射线衍射、透射电镜、红外光谱、穆斯堡尔谱、差热分析等技术, 查明了结核、结壳主要由锰相矿物、铁相矿物和脉石矿物组成, 其中锰相矿物主要有水羟锰矿、钙锰矿, 铁相矿物主要有针铁矿、纤铁矿, 脉石矿物主要有蒙脱石、伊利石、钙十字沸石等(许东禹等, 1994b; 何高文等, 2001; 梁德华, 1992; 陈圣源等, 1997; 朱克超等, 2001; Aplin et al., 1985; Hein et al., 1988)。利用 X 射线荧光光谱分析、原子吸收法、容量法、等离子体发射光谱(ICP-OES)等技术方法, 对结核、结壳中的常量、微量(Mn, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, REE 等)元素含量进行测定, 并对常、微量元素的共生和相关关系、稀土元素分配模式等进行了大量研究(Halbach, 1984; Halbach et al., 1984; Jung et al., 1999; Joshima et al., 1998; Melnikov et al., 1996; 薛婷等, 2008; 张美等, 2007, 2009)。

在成矿物质来源方面, 认为主要有 3 种: 外源、内源和水成。外源主要与外力作用有关, 包括太阳引力、重力、地球自转、生物活动、陆源物质搬运等。内源主要与内力有关, 包括构造、岩浆和热液作用等。水成来源与大洋水层结构、水化学和水动力有关, 包括水化学结构、碳酸盐系统和含氧量及其垂直分带、水动力学特征、大洋生物生产力、海底岩石海解作用等。

在结核、结壳成因和成矿机制方面, 根据成矿物质来源不同, 提出了结核的“水成说”、“成岩说”和“热液成因说”等成因假说(Halbach et al., 1981; Mills et al., 2001); 根据结核、结壳的构造、矿物、化学和生物组分及主要成矿元素的地球化学特征, 认为结核、结壳的生长是通过氧化还原反应、胶体化学、生物化学作用完成的, 其中

Fe, Mn 以氢氧化物和氧化物的形式形成独立矿物, 其他元素以类质同像或吸附方式进入矿物中 (许东禹等, 1993; 许东禹等, 1994a)。

近年来, 我国学者注意到结核中超微生物的作用, 提出结核是超微生物的建造体 (边立曾等, 1996; 陈建林等, 1997), 为生物成矿说提供了新证据。

有些学者利用结核、结壳 Sr, Nd, Pb, Hf 等同位素提供的信息, 研究古海洋环境的变化 (Alexander et al., 2000; Burton et al., 1999a, 1999b; Christensen et al., 1997; Clauer et al., 1984; David et al., 2001; Frank et al., 1998, 1999; Henderson et al., 1999; Ito et al., 1998; Ling et al., 1997; O' Nions et al., 1998; Reynolds et al., 1999; Smith et al., 1989; 孙志国等, 1996; 刘季花等, 2003); 利用 He, Fe 同位素判别物质来源 (李延河等, 1997; Fields et al., 1999), 取得了不少新的认识。

综上所述, 大洋多金属结核和富钴结壳自被人类发现以来, 特别是近 40 年来, 科学家们从不同的角度、利用不同的手段, 对其进行了大量的研究, 特别是结核, 研究程度可谓相当高。尽管如此, 仍有很多问题尚无统一认识, 有些认识还比较肤浅, 主要表现在: 物质来源的判别不够精细; 主要成矿元素赋存状态不够确定; 成矿机制尚无定论。特别是对于结核和结壳之间的差异性对比研究不够深入。鉴于此, 本书尝试从成矿环境、地质地球化学特征和分布特征等诸方面对比研究入手, 利用新的测试手段和成矿理论, 探讨二者差异性产生的内在原因, 进而对比研究结核和结壳成矿机制。

2 研究区地质概况及结核和结壳区地质背景对比

2.1 研究区位置与区域地形

2.1.1 研究区位置与地形特征

研究区位于太平洋赤道以北，大致范围 $150^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{W}$ ， $7^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ （图 2.1），从西往东依次为结壳区和结核区，其中结壳区包括西太平洋麦哲伦海山区、马绍尔群岛海山链、马尔库斯-威克海山区、中太平洋海山区、莱恩群岛海山区；结核区为 COMRA（中国大洋矿产资源研究开发协会）开辟区，包括东、西两区，位于东太平洋海盆 CC 区（即克拉里昂（Clarion）—克里帕顿（Clipperton）两条断裂带所限定的区域）（图 2.3、图 2.4）。



图 2.1 研究区位置示意图

1~5—结壳区：1—麦哲伦海山区；2—马绍尔群岛海山链；3—马尔库斯-威克海山区；4—中太平洋海山区；5—莱恩群岛海山区；6、7—所示的红色多边形区域为 COMRA 结核区（中国）；其他多边形区—其他国家登记的结核区

结壳区地形以绵延起伏、星罗棋布的海山为特征（图 2.2）；结核区则为广阔的深海平原和深海丘陵（图 2.3）。

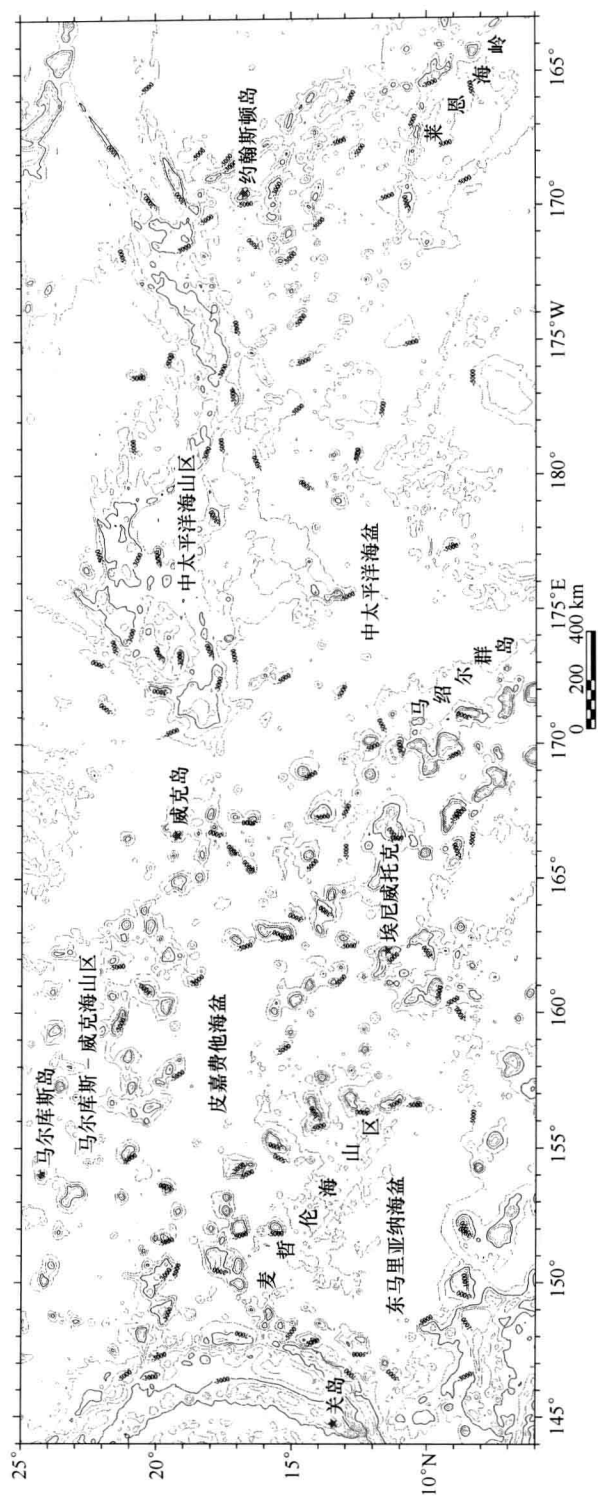


图 2.2 研究区地形图 (一)
(据美国 NOAA 数据编绘, 等值线间距 1000 m)

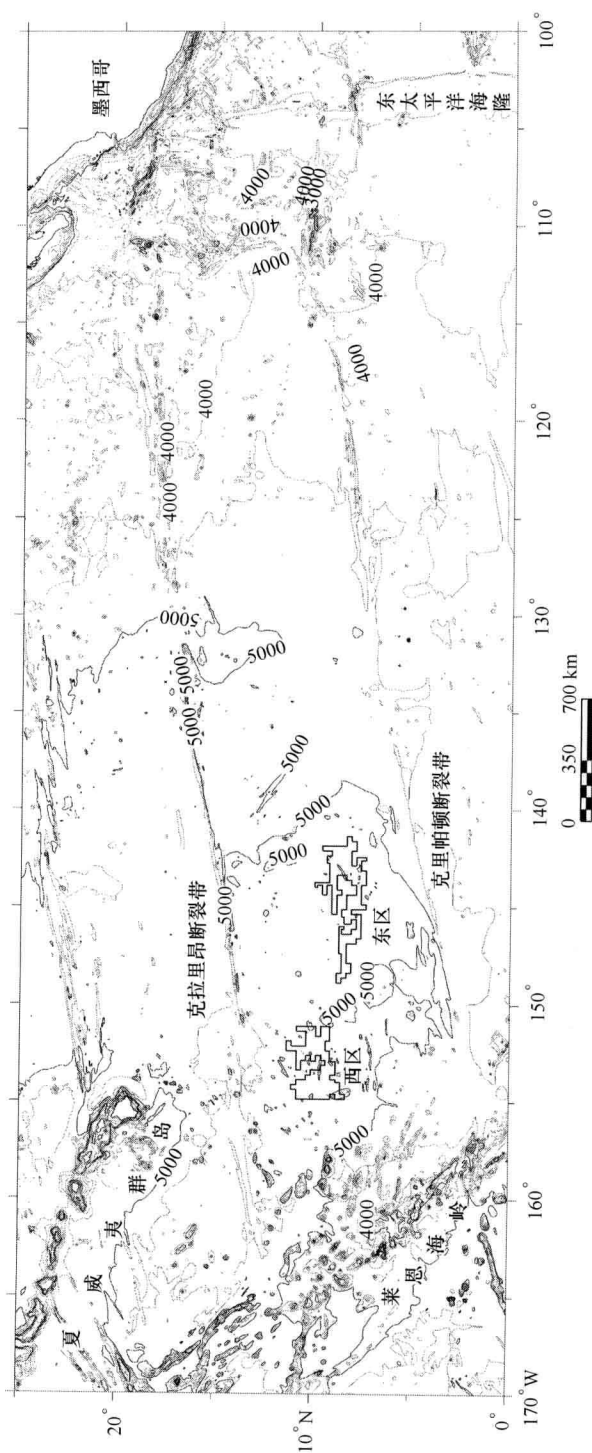


图 2.3 研究区地形图 (二)

(据美国 NOAA 数据编绘, 等值线间距 500 m, 多边形区为 COMRA 结核区)