

朱克超 李振韶 何高文 等著

东太平洋多金属结核矿产

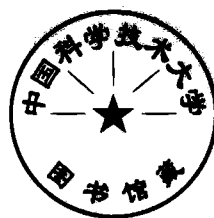
DONGTAIPINGYANG
DUOJINSHU JIEHE
KUANGCHAN



地质出版社

东太平洋多金属结核矿产

朱克超 李振韶 何高文 赵祖斌 著
曾瑞坚 陈圣源 朱本铎



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统总结了国土资源部“海洋四号”船“九五”期间在我国东太平洋多金属结核开辟区进行的 DY95-7、DY95-9 航次多金属结核资源勘探的研究成果,充分利用了“八五”期间的航次调查研究成果和“九五”大洋研究课题的成果,分析了开辟区多金属结核成矿环境,详细论述了多金属结核矿床特征,进行了多金属结核资源评价,探讨了多金属结核成因及分布规律。

本书可供海洋地质、矿产地质等专业的地质工作者及地质院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

东太平洋多金属结核矿产/朱克超等著. -北京:地质出版社, 2001. 9
ISBN 7-116-03458-7

I. 东… II. 朱… III. 海底矿物资源: 多金属矿床-结核 (沉积学)-研究-太平洋 IV. P744

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 063432 号

责任编辑: 祁向雷 陈 肖

责任校对: 黄苏晔

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 29 号, 100083

电 话: 82324508 (邮购部); 82324577 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: 010—82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂印刷

开 本: 787 × 1092 ¹/₁₆

印 张: 13.25; 彩色图版: 2 页, 黑白图版: 6 页

字 数: 307000

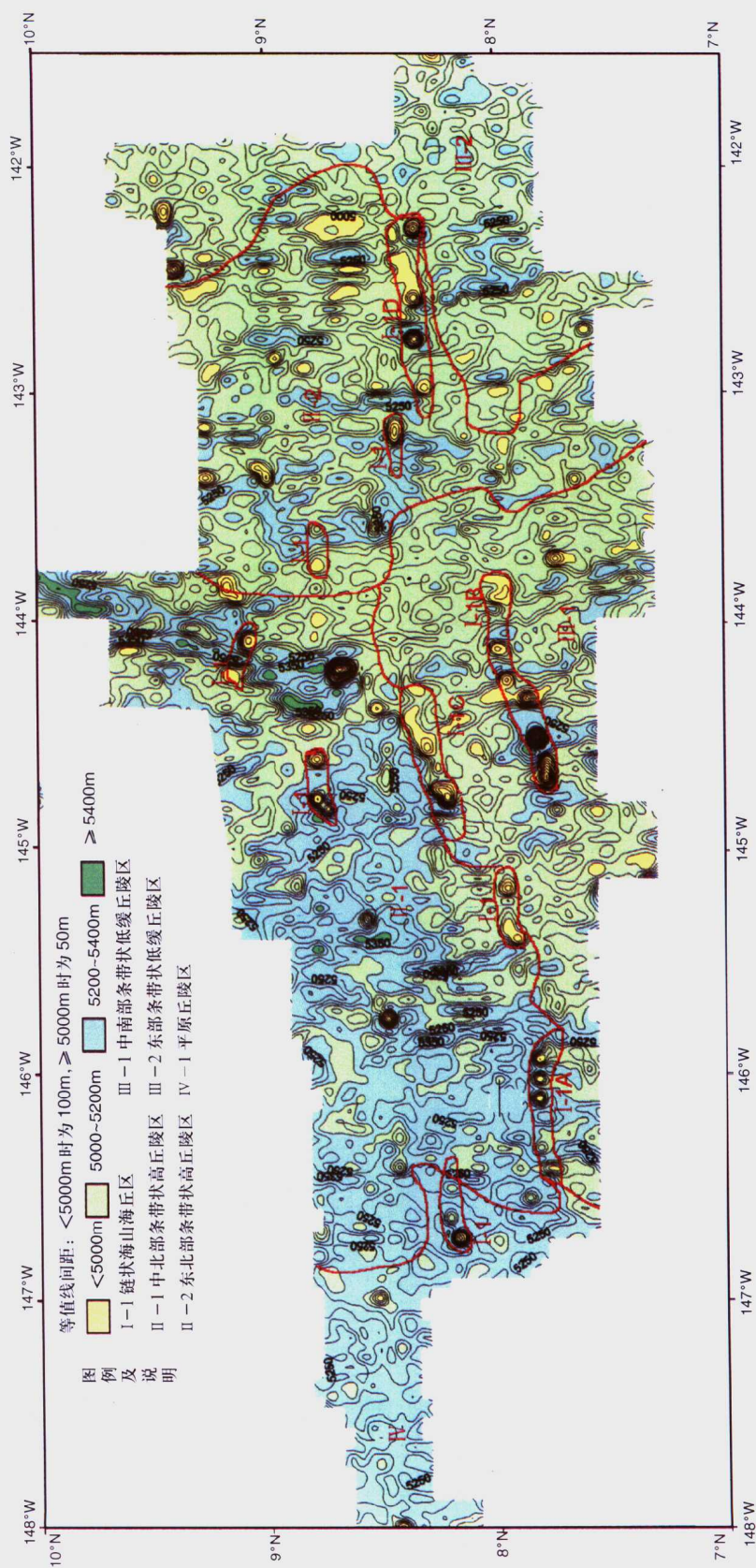
印 数: 1—400

版 次: 2001 年 9 月北京第一版·第一次印刷

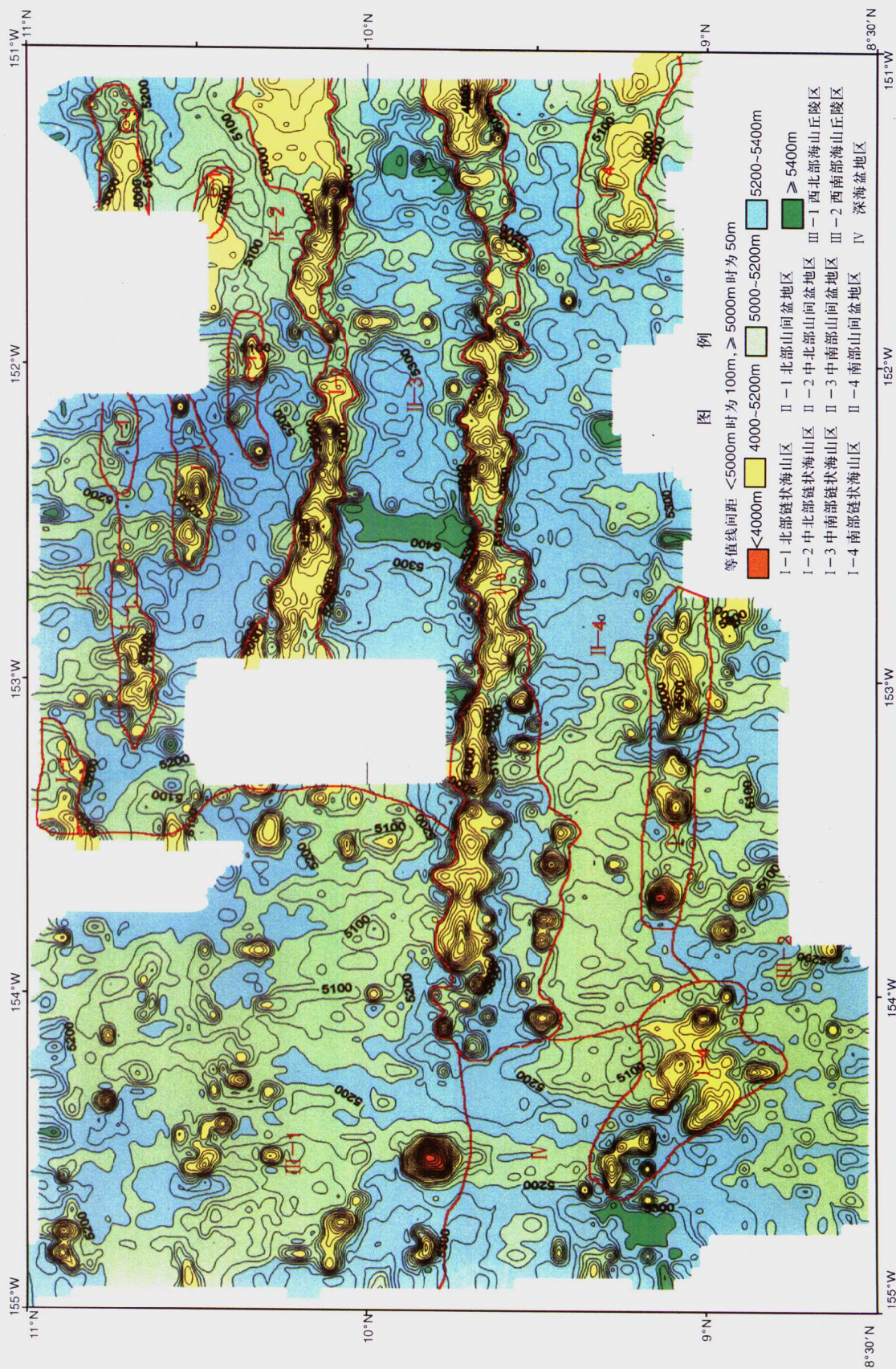
定 价: 35.00 元

ISBN 7-116-03458-7/P·2207

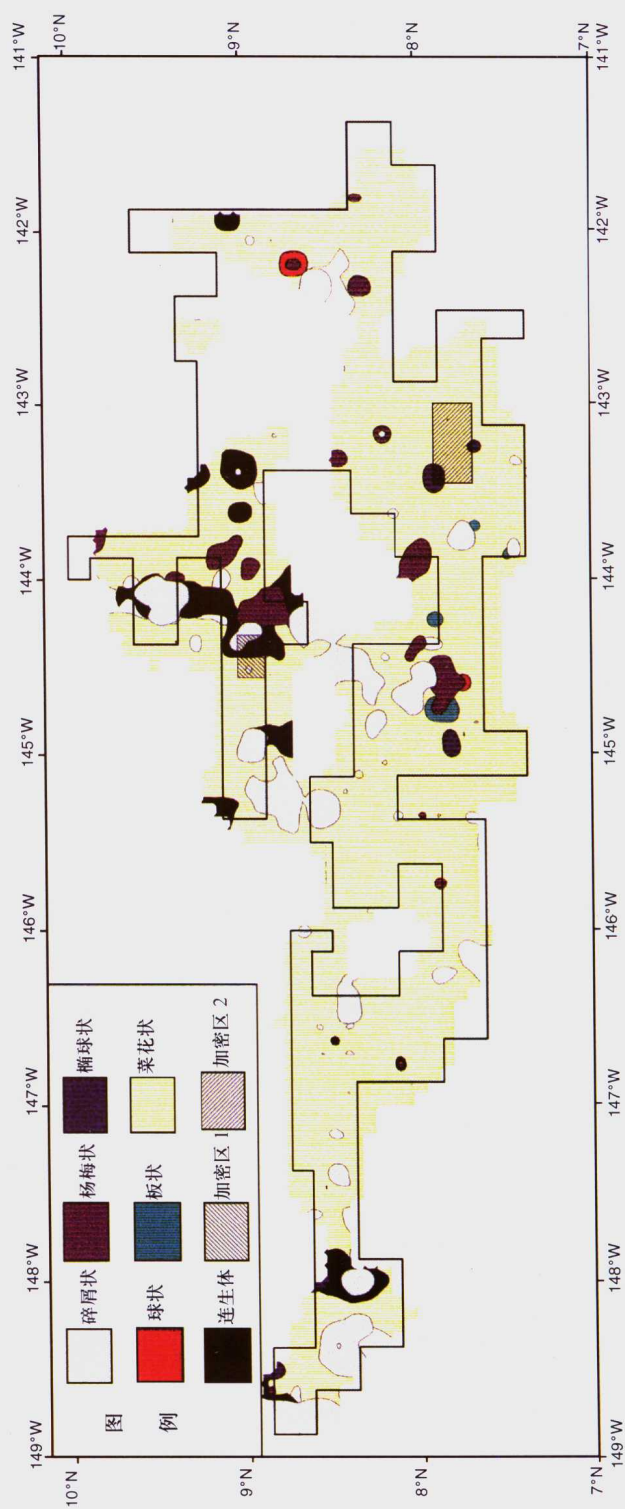
(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)



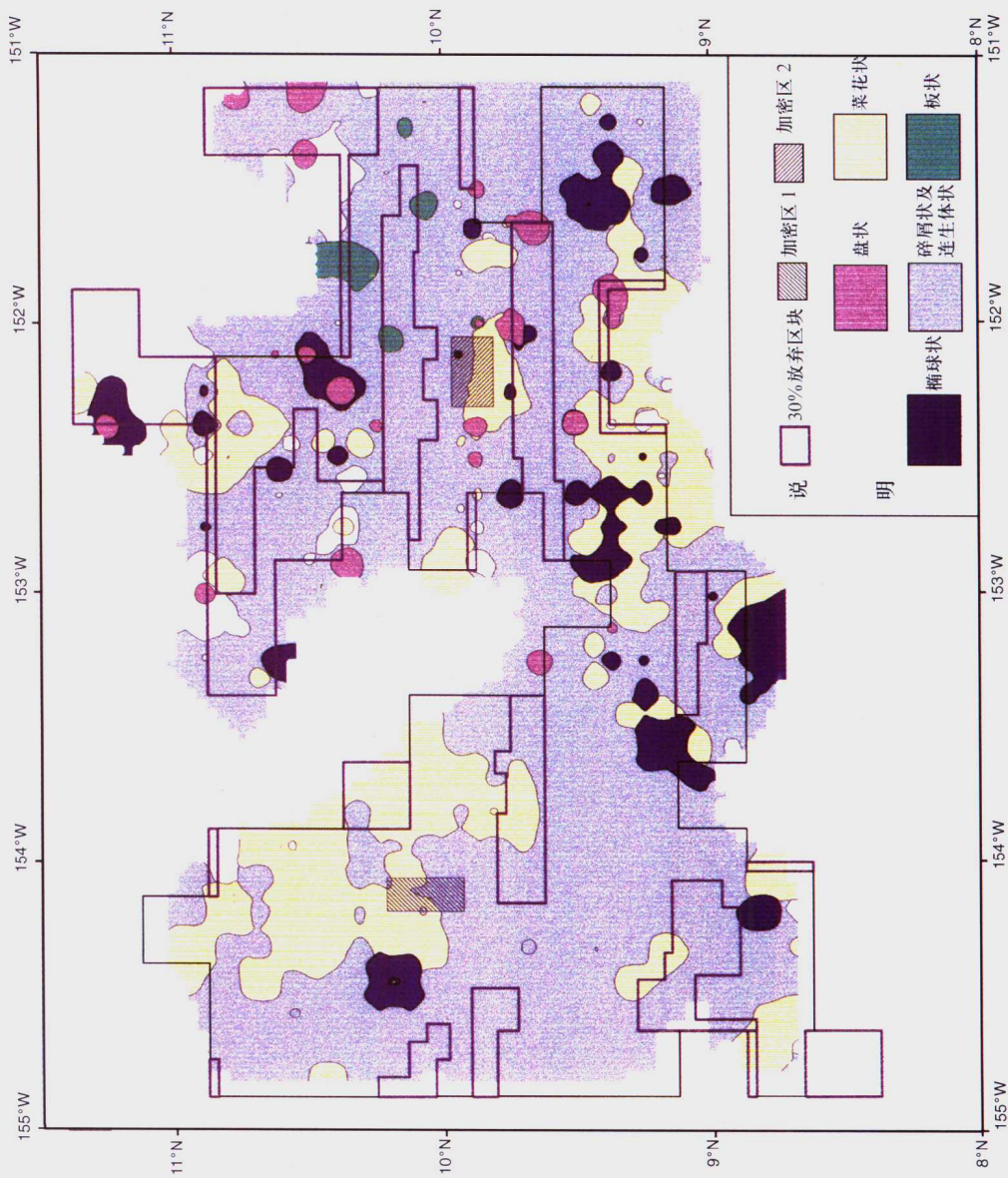
彩图 I 东区海底地形地貌分区图



彩图 II 西区海底地形地貌分区图



彩图Ⅲ 东区结核类型分布图



彩图 IV 西区结核类型分布图

序

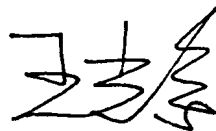
当前,人类生存与发展面临人口、资源、环境三大问题,随着陆地资源的不断消耗,合理地开发、利用海洋资源已成为世界各国的重要战略目标和竞争焦点。从20世纪50年代末开始,美国、日本、法国、德国和原苏联等一些发达国家及其财团在东太平洋海域开展了大规模的多金属结核勘查活动,并陆续圈定了多金属结核富矿区。至70年代,对多金属结核矿产的开采和冶炼的试验工作也具备了相当的规模。我国作为一个发展中的海洋大国,虽然起步较晚,但也应在大洋多金属结核勘查领域占有一席之地。80年代我国开始进行大洋多金属结核调查,我国的科学考察船先后在中太平洋海盆和东太平洋CC区进行了八个航次的调查,调查面积达200万 km^2 ,在CC区圈定了30万 km^2 具有商业价值的远景矿区。1991年3月5日经联合国海底管理局筹委会批准,中国大洋矿产资源研究开发协会(简称“大洋协会”)成为继印度、法国、原苏联、日本等国之后第五个先驱投资者,获得了在东太平洋CC区15万 km^2 多金属结核开辟区,维护了我国在国际海底资源开发活动的权益。

根据大洋协会组织制订的大洋多金属结核勘查“八五”和“九五”规划,“九五”期间共进行了五个航次的勘查,内容包括加密站位地质采样、多波束测深、深拖视像剖面观测、环境基线调查等,取得了丰富的基础资料及大量样品,为最终圈定7.5万 km^2 保留区提供了依据。广州海洋地质调查局圆满完成了DY95-7、DY95-9航次的加密调查,保证了“九五”勘查目标的如期实现和50%区域放弃。本书是在DY95-7航次及DY95-9航次勘查报告的基础上,经归纳提炼,并吸取部分“九五”大洋科研课题的研究成果编写而成的,集中反映了“九五”期间大洋多金属结核调查及研究成果,成果的取得是与大洋协会、国家海洋局、中国地质调查局等有关部门的领导和周密协调,以及参加“海洋四号”、“大洋一号”船海上调查的广大科技人员和船员战风斗浪、奋勇拼搏、团结协作圆满完成航次调查任务分不开的。

当今海洋高技术的发展日新月异,高精度全覆盖海底地形探测技术、深拖视像技术、深潜器技术等已应用于深海调查领域,一些新的海洋资源调查领域不断得到拓展,如富钴结壳、海底硫化物、天然气水合物的调查逐渐成为热点。我国在海洋高技术的应用及上述领域的调查研究已逐步开展并取得可喜的成果。

本书系统总结了我国多金属结核开辟区的成矿环境,详细论述了多金属结核矿床特征,进行了多金属结核资源评价。特别对于多金属结核壳层地球化学特征、多金属结核类型及化学成分分布规律及与地形地貌的关系进行了详细论述,从而对我国开辟区多金属结核的分布规律有了进一步认识。

我国海洋矿产资源调查事业任重而道远，让我们从事海洋地质工作的同行们，瞄准海洋高技术及海洋科学研究的前沿，不断开拓进取，为我国的海洋地质工作作出新的贡献。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of three main characters: '王' (Wang), '志' (Zhi), and '强' (Qiang).

2001 年 3 月 15 日于广州

前 言

多金属结核是重要的海底矿产资源。我国对大洋多金属结核的调查研究始于 20 世纪 80 年代, 20 年来取得了令人瞩目的成就。“七五”期间, 共进行了八个航次的调查, 在 CC 区圈定了 30 万 km^2 具有商业价值的远景矿区。1991 年 3 月 5 日经联合国海底管理局筹委会批准, 中国大洋矿产资源研究开发协会成为继印度、法国、原苏联、日本等国之后第五个先驱投资者, 获得了在东太平洋 CC 区 15 万 km^2 多金属结核开辟区。“八五”期间在我国开辟区内进行了 4 个航次的多金属结核勘查工作, 在此基础上完成了开辟区 30% 的区域放弃工作。“九五”期间共进行了五个航次的勘查, 内容包括加密站位地质采样、多波束测深、深拖视像剖面观测、环境基线调查等, 取得了丰富的基础资料及大量样品, 为完成开辟区另外 20% 的区域放弃工作, 最终圈定 7.5 万 km^2 保留区提供了依据。广州海洋地质调查局圆满完成的 DY95-7、DY95-9 航次的加密调查, 保证了“九五”勘查目标的如期实现和开辟区 50% 的区域放弃。

本书系统总结了国土资源部“海洋四号”船“九五”期间在我国东太平洋多金属结核开辟区进行的 DY95-7、DY95-9 航次多金属结核资源勘探的成果, 充分利用了“八五”期间的航次调查成果和“九五”大洋研究课题的成果, 分析了开辟区多金属结核成矿环境, 详细论述了多金属结核矿床特征, 进行了多金属结核资源评价, 探讨了多金属结核成因及分布规律。

全书共分四章, 具体编写人员为: 陈圣源 (第一章第一节, 第二章第一节), 何高文 (第一章第二节, 第四章第一节、第二节), 朱本铎、鲍才旺 (第二章第二节), 李振韶 (第二章第三节), 曾瑞坚、张学华 (第二章第四节), 朱克超 (前言, 第三章第一节、第二节、第三节、第四节、第五节、第六节、第七节、第八节, 结论), 赵祖斌 (第二章第三节, 第三章第四节), 最后由朱克超统稿。结核的 X 射线荧光光谱分析、化学分析由广州海洋地质调查局测试中心完成, 矿物的 X 射线衍射、红外光谱、透射电镜等分析由中国地质科学院矿床所完成, 稀土分析由南京大学地质系中心实验室完成。承蒙金庆焕院士、王光宇、张国祯、黄永祥等专家对 DY95-7、DY95-9 航次勘查报告进行评审并提出宝贵的意见和建议; 书稿编写完成后, 陈圣源对全书进行了校对。莫月珍、韦东菊同志清绘了部分图件, 在此向他们表示衷心的感谢, 也向参加“海洋四号”船 DY95-7、DY95-9 航次海上调查的科研人员和船员表示衷心的感谢。

特别感谢曾任“海洋四号”船 6 个航次首席科学家的王光宇教授为本书作序。

作 者

2001 年 3 月于广州

目 录

序

前言

第一章 大洋多金属结核资源概况	(1)
第一节 国内外调查研究现状	(1)
第二节 资源需求与前景	(2)
第二章 多金属结核成矿环境分析	(5)
第一节 成矿地质背景	(5)
第二节 海底地形地貌	(10)
第三节 沉积物	(18)
第四节 物理海洋与海洋化学	(64)
第三章 多金属结核矿床特征	(85)
第一节 结核类型	(85)
第二节 结核内部构造	(90)
第三节 结核物质组成	(92)
第四节 结核地球化学特征和品位	(106)
第五节 结核丰度和覆盖率	(138)
第六节 结核分布及与地形地貌的关系	(147)
第七节 多金属结核成矿作用、成矿时代及成矿环境	(163)
第八节 多金属结核成因研究进展	(168)
第四章 多金属结核资源评价	(173)
第一节 资源量计算方法	(173)
第二节 资源评价	(175)
结论	(196)
参考文献	(198)
英文摘要	(200)
图版说明及图版	(202)

第一章 大洋多金属结核资源概况

第一节 国内外调查研究现状

早在 1872~1876 年,英国“挑战者”号船在环球考察时,首次发现了大西洋底的多金属结核,继这一历史性的发现后,一些国家在各大洋考察时都有类似的发现。但 20 世纪 50 年代之前,因为在相当一段时间内,人们一直没有真正认识多金属结核的经济价值,加上结核勘探和开采技术要求较高,当时难于实现,所以,对多金属结核只停留在探索阶段,60 年代后随着科学技术和工业的高速度发展,矿产需求量日益增高,而陆地的金属矿产迅速消耗,可以预料早晚有枯竭的时候。为了工业和科学技术的持续发展,各国不得不把眼光由陆地转向海洋。为此,美国、英国、日本、法国、联邦德国和原苏联等先进工业国在中、东太平洋进行了有计划大规模的调查,发现了 $7^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\sim 158^{\circ}\text{W}$ 及 $7^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$ 、 $165^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{W}$ 之间的深海区为多金属结核富集带。从 1970 年到 1980 年陆续圈定了富矿区。经过大量调查研究,现已基本上了解了多金属的分布与地形、沉积物类型、底流、生物生产力带、水深、古海洋环境条件、构造及火山作用的关系;多金属结核分类、化学成分和矿物组成;多金属结核的生长速率及形成机理;多金属结核的形成、一般赋存规律和区域变化特征。这些成果已反映在大量研究报告、论文、专著和调查报告中,但许多方面的研究有待进一步深化。如多金属结核的形成时代及其生长历史,结核的形成与沉积史之间的内在联系,结核类型区域变化、分布规律与结核生长史、沉积史、地质构造演化史等之间的关系。

通过大量调查还发现了富钴多金属结壳、多金属软泥、块状硫化物矿床等一些新的深海矿产资源。随着调查方法日臻先进,有些国家已开始了试验性的开采。

1969 年,联合国大会通过宣言,宣布海床、洋底及其资源是人类共同继承的财产。1982 年,联合国第三次海洋法大会通过了《海洋法公约》,建立了国际海底采矿登记制度。现在已有一些国家向联合国国际海底管理局和国际海洋法法庭筹备委员会提出勘探和开采的申请和登记。

20 世纪 60 年代以来,在太平洋海域进行了多个航次的深海钻探(DSDP)和研究工作,对查明区内地层层序及时代和研究板块构造理论都起了重要作用。

我国开展大洋地质科学调查起步晚,较美国、日本、原苏联等国迟了 20 年。1983 年国家海洋局首次派船到中太平洋海盆东部进行了试验性调查。1986 年地矿部“海洋四号”船首航太平洋,开始了国际海底资源调查。“七五”期间,我国在太平洋中部 CP 区和 CC 区,进行了八个航次调查,调查面积 200 万 km^2 以上,圈定出 30 万 km^2 的富矿区,并于 1990 年 8 月 22 日,我国向联合国海底管理局筹委会递交了《中华人民共和国政府要求将中国大洋矿产资源研究开发协会登记为先驱投资者的申请书》,1991 年 3 月 5 日获得批准。

从而使我国获得了 15 万 km^2 多金属结核开辟区。区内调查网度 $15' \times 15'$ ，共有地质测站 208 个，平均丰度 6.44kg/m^2 ，平均品位 2.29%。水深测线间距 $7.5'$ 。这些资料对多金属结核资源评价、结核分布富集规律，开采的地形地貌条件及环境基线评估还是远远不够的。为此，“八五”、“九五”期间共进行 10 个航次的加密调查及多波束测深、深拖剖面测量、环境基线观测，使区内调查网度达 $5.3' \times 5.3'$ ，共有地质测站 1596 个，并进行了多波束全覆盖地形测量，数条南北向和东西向视像剖面测量以及大面站（地质、化学、生物）环境基线调查，初步建立了环境基线。通过上述调查勘探工作，特别是 DY95-7、DY95-9 两航次的加密调查，对我国开辟区内结核资源分布规律有了进一步的认识，为第二期（20%）区域放弃提供了重要的基础资料。经过 50% 区域放弃，圈定了区内保留的富矿块，总面积约 7.5 万 km^2 。多波束全覆盖测深及精细后处理，揭示了开辟区东区条带状丘陵与槽、沟相间北北西向展布的地形特征，西区横贯区内的东西向海山链与山间盆地构成的宏伟景观；深拖视像调查直观地显现了结核分布在纵横向上的“条”、“块”状态；环境调查也获得了大量地质、化学、生物等宝贵的基础资料，为进一步勘探及开采提供了依据。

通过“八五”、“九五”的调查和研究，我们对东太平洋海盆（特别是我国开辟区）的地形地貌，重磁场特征，地层层序，洋壳起伏，沉积物类型、时代及分布，多金属结核的生成环境，赋存规律及结核类型、丰度、覆盖率、品位和结核矿床类型等有了进一步的认识，并进行了海洋地质学、地质构造学、古海洋学、海洋矿产学领域的科学研究，取得了一批接近和达到世界先进水平的成果，表明我国在国际海底矿产资源调查领域跨进了世界先进行列。

“八五”、“九五”期间虽取得了可喜的成果，但与美、日、法、俄罗斯等国相比，我国在勘探研究程度（如局部区域详查），勘探设备及技术方法配套等方面都还有差距，随着对矿产资源需求的变化，结核资源开采前还需做大量的勘探及开采前试验工作。

第二节 资源需求与前景

大洋多金属结核中富含 Mn、Co、Ni、Cu 等金属，但由于其赋存于水下 5000m 的海底深处，且远离陆地，需要借助高新技术才能开采上来，其投入成本要远远高于陆地矿产的开采，因此，对大洋多金属结核的资源需求主要取决于陆地矿产的储备状况以及全球对其所含金属的消费量。

一、陆地资源储备与产量、消费量

世界陆地铜资源丰富且分布广泛，镍资源丰富但分布范围较窄；钴资源主要伴生在铜和镍矿中，分布范围也较窄；锰资源丰富，分布广泛，但富矿分布局限。截至 1999 年底（据 Mineral Commodity Summaries, 2000），世界陆地铜矿储量 3.4 亿 t，资源量 16 亿 t；镍矿储量 4600 万 t，资源量 1.3 亿 t；钴矿储量 450 万 t，资源量为 1100 万 t；锰矿石储量 6.8 亿 t，资源量 35.37 亿 t。这几种金属在我国的储备情况见表 1-1，从中可以看出，四种金属矿产储量在世界所占的份额并不大，与资源消费大国的状况很不相称。

据 1999 年的统计结果（Mineral Commodity Summaries, 2000），世界铜矿山产量 1260 万

表 1-1 中国几种金属矿产资源储备

金 属 矿 产	铜	镍	钴	锰
储量/万 t	1800	370	34	4000
基础储量/万 t	3700	790	52	10000
占世界储量的比例/%	5.3	8.0	7.6	5.9

注：铜、镍、锰资料来源于 Mineral Commodity Summaries, 2000 年 2 月；钴资料来源于“深海采矿前景预测”（萧汉强等, 1995）。

t, 镍矿山产量 114 万 t, 钴矿山产量 2.83 万 t, 锰矿山产量 674 万 t。我国铜、镍、锰三种金属的矿山产量分别为 45 万 t、5.1 万 t、120 万 t；钴矿山产量仅有 100~200t, 呈负增长, 钴矿为伴生矿产, 我国 2/3 的钴产自镍矿, 其产量受镍矿的制约。

铜主要用于电力、建筑、机械制造、运输和兵器等工业, 其代用品主要为铝; 镍主要用于合金钢、有色合金、超级合金和电镀等工业产品中, 其代用品主要有钛、锌、铝等金属及塑料、陶瓷; 钴主要用于超级合金、硬质合金、磁性合金、陶瓷、化学制品, 钴的代用品不多; 锰主要用于钢铁工业的脱氧、脱硫过程。1990 年世界铜消费量为 1077.3 万 t, 稍低于铜的矿山产量, 镍消费量为 84.2 万 t, 精炼钴消费量为 2.4 万 t, 锰的消费量与钢铁工业密切相关。

二、陆地资源对需求的保证程度

据萧汉强等(1995)采用历史法和弹性系数法, 以 1990 年为基数年份作出的预测, 世界铜、镍、钴、锰的储量可供开采年限分别为 32~34 年、35~40 年、32~37 年、23~27 年, 采用排产法预测, 我国分别为 22 年、30 年、30 年、20 年, 考虑到储量基础和采选冶技术的提高, 开采年限应该比预测数更长。在这四种金属中, 铜、镍、锰是传统金属, 主要应用于传统产业中, 钴则被视为一种新金属, 在现代工业中广泛使用, 随着高新技术产业(包括军事及空间技术)的不断发展, 其需求量将逐渐扩大。

三、大洋多金属结核矿产资源开发前景分析

大洋多金属结核矿产能否进入商业性开发, 具体受四个方面的制约: 对所含金属的需求程度、陆地资源的保证程度、开采技术的可行性、开采利润。如果人们对多金属结核所含的金属需求猛增, 而陆地资源又无法满足, 人们有可能把目光转向海洋, 但是, 如果开采技术条件不成熟, 或者投入成本太高, 无利可图, 人们就不可能对其进行商业性开发。

多金属结核中含有多种金属, 其中铜、镍、钴、锰具有商业利用价值, 并具有很重要的战略地位。这些金属在不同的工业领域发挥着重要作用, 各自虽有一些代用品, 但都不能被完全替代, 估计在很长一段时间内, 还存在对这些金属的需求。如前所述, 陆地矿山储量基本能够保证到 21 世纪前 20~30 年, 如果考虑技术进步和矿产地的新发现, 估计 21 世纪前半叶具有资源保证。

近几十年来, 各深海先驱投资者国家和美国深海采矿各财团相继开展了大洋多金属结核采矿的各种可行性试验研究, 取得了一些初步成果。根据有关机构的经济技术评价结果, 一个年产 300 万 t 干结核的矿区, 同时回收铜、镍、钴、锰四种金属, 动态分析其总

利润为 41 亿多美元，9 年可回收全部投资，由此可见，多金属结核采矿还是具有极大收益的。尽管如此，深海采矿作为一项高风险、高投资的产业，各先驱投资者国家在开展实质性开采之前，都对其持谨慎态度。

此外，有人担心，多金属结核的开采将会对深海环境带来不可恢复的后果，势必将会对生态环境造成破坏，这些人呼吁放弃对深海多金属结核的开采。另一方面，由于开采结核的环境影响，很多国家已将重点放在对深海环境破坏相对较小的海山富钴结壳的调查研究上。这些因素都将对多金属结核的开采带来负面影响。

综上所述，可以预测，多金属结核的开发将会在相当长的一段时间处于停滞状态，大洋多金属结核仍将作为一种储备资源存在。

第二章 多金属结核成矿环境分析

第一节 成矿地质背景

一、构造背景

我国多金属结核开辟区位于太平洋板块中的一个中间块体上的局部海域，即著名的CC区西部，东距太平洋海隆扩张脊4000km，西邻莱恩海岭，海洋四号断裂带穿插其中，北临克拉里昂断裂带，南靠克里帕顿断裂带，中有欧罗兹科断裂带通过。区内地质构造主要受上述大构造的控制，构成北东东—南西西向和北北西（近南北）向构造地形带，造就了区内构造格局与框架（图2-1）。

二、火山活动

随着太平洋板块的不断消亡与增生，扩张中心的转移，板块中不同部位应力场的变化，区内断裂与火山活动强烈。

太平洋中火山发育，约有10000个，靠近研究区的有莱恩群岛、加拉帕戈斯群岛等都由火山构成，夏威夷群岛上至今仍有火山喷发；火山活动明显受断裂控制，CC区一带火山多呈北东东—近东西向分布，次有北北西—近南北向；研究区一带多个航次单道（或多道）地震剖面中均见有火山喷发的明显迹象，喷发时期有早有晚，新生代以来至少有三期以上（图2-2）。在研究区内形成了众多海山和海丘，在西区组成三条壮观的东西向海山链及西、北部散布的孤立海山和高海丘，在东区组成四段串珠状海山、海丘链和北北西向条带状海丘。

三、区域地球物理场

1. 重力场特征

研究区自由空间异常以低缓异常为基本特征，布格异常则以高缓异常为其特征，为典型大洋盆地重力特征。东区自由空间异常较低，海山（海丘）表现为重力高，洼地为重力低，而布格异常则正好相反；西区自由空间异常略有升高，海山（链）之上，空间异常为重力高（带），而深海丘陵区 and 山间盆地地区为重力低，布格异常则恰好相反。根据重力异常计算的地壳厚度，全区变化不大，一般在6~7km，属大洋型地壳（图2-3）。

2. 磁力场特征

区内 ΔT 磁异常基本上为负值，一般在-20~120nT范围内变化，区域异常显示磁条带形迹，但异常较低，难追踪对比识别，局部异常显示为正异常，负异常或伴生异常，常组成串珠状异常带，这些异常多由海山或海丘（链）所引起，反映了不同时期火山活动结

