

太平洋海山钴结壳 资源评价

张富元 章伟艳 朱克超 程永寿 编著



海洋出版社

太平洋海山钴结壳资源评价

Evaluation of Ferromanganese Crust Resources on Seamounts in the Pacific Ocean

张富元 章伟艳 编著
朱克超 程永寿

海洋出版社

2011年·北京

内容简介

本书系统地论述了大洋钴结壳资源评价理论与方法。作者采用以区域性钴结壳资源的实际调查资料为依据和系统搜集整理相关文献资料,深入研究钴结壳资源分布规律,分析确定钴结壳矿区圈定的参数指标,建立钴结壳资源评价方法,开发钴结壳矿区圈定和资源量计算软件,在发表相关研究论文、取得区域性研究成果和成功经验积累基础上,拓展到对整个太平洋进行钴结壳资源评价。本书主要内容包括:钴结壳资源调查研究概况,钴结壳资源评价的基本理论与方法,钴结壳资源评价的数据和术语,太平洋区域地质特征,钴结壳年龄、生长速率和成因,钴结壳地球化学,钴结壳矿物学,钴结壳资源的分形分析,克立格法和神经网络分析,钴结壳资源分布规律和圈定矿区的参数指标,钴结壳矿区圈定和资源量计算方法,太平洋海山钴结壳资源量估算,钴结壳资源评价的程序设计和软件开发。

图书在版编目(CIP)数据

太平洋海山钴结壳资源评价/张富元等编著. —北京:海洋出版社, 2011. 8
ISBN 978 - 7 - 5027 - 8092 - 0

I. ①太… II. ①张… III. ①太平洋 - 钴矿物 - 结壳岩 - 资源评价
IV. ①P618. 620. 618. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 169640 号

责任编辑:王 溪

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 12.25

字数: 280 千字 定价: 50.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

随着世界人口的持续增长,人们生活条件不断改善以及技术进步,对矿产需求量不断扩大。尽管人们在努力寻找陆地矿床和改善低劣矿的处理方法,同时采取能源多样化等措施,但仍不能满足日益增长的世界人口对矿产资源的消耗。预计到2020年,世界人口将超过80多亿。那时,满足消费者对矿产资源和能源需求将变得十分困难,从品位越来越低的金属矿产中提取有用的原材料就要多的能量投入,然而获得的利益递减,直到无经济效益。最终在耗尽了高品位的陆地矿产资源并提高资源价格后,人们不得不把海洋矿产作为未来采矿对象。陆地矿产资源战略研究表明,陆地锰、铜、钴、镍矿产资源在30~50年后将逐渐枯竭。我国是资源大国,但锰、铜、钴、镍矿石品位低,人均储量低于世界平均水平。《联合国海洋法公约》规定,国际海底及资源是人类共同遗产。我国应进行国际海域矿产资源评价和分享国际海域矿产资源。

《联合国海洋法公约》正式生效和国际海底管理局成立,标志着大洋矿产资源开发的法律问题已解决。国际海底及其资源十分丰富,据估计仅太平洋多金属结核就有约 1.7×10^{12} t,海洋中钴结壳资源量多达 $(10 \sim 2\ 680) \times 10^8$ t,是大陆钴资源量的300多倍。

大洋钴结壳资源勘查目的之一就是要估算出钴结壳资源量。然而迄今为止,国内外尚未准确合理地估算出太平洋海山钴结壳资源量。究其原因,一是因为太平洋幅员辽阔,水深大,海山分布浩瀚,举国之力也难以调查清楚钴结壳资源分布真实情况;二是对不同高度、不同年龄的每座海山不知如何科学合理地赋予它们钴结壳厚度。我们基于对太平洋海山钴结壳资源分布规律和钴结壳矿区圈定参数指标的深入研究,以太平洋海山钴结壳资源调查资料为依据,创造性地按海山不同高度、不同洋壳年龄赋予不同结壳厚度,首次计算出太平洋海山干结壳资源量为 $1\ 014.11 \times 10^8$ t,锰 222.29×10^8 t,钴 6.08×10^8 t,镍 4.46×10^8 t,铜 1.32×10^8 t,太平洋海山结壳分布面积为 $2\ 062\ 862$ km²,结壳资源量和金属量与全球陆地资源量相比都是极为可观的,钴结壳中锰、钴、镍、铜的金属量分别是陆地资源量的11.11倍、71.58倍、8.26倍、0.29倍。但是,同时能满足钴结壳矿区面积300 km²、钴结壳覆盖率40%和钴结壳厚度2 cm三个条件的钴结壳资源量有限。锰、铜、钴、镍是战略金属物资,在25种战略意义最大的矿产中,锰、钴、铜分别列第2、第3、第4位。海洋矿产资源历来受到各国政府重视并展开激烈争夺。日本、印度等国把海洋矿产资源列为准国土资源来开发,把深海采矿看作是进入高科技领域的重要组成部分。

20世纪80年代,德国、美国、日本等国相继对钴结壳进行深入而系统的调查研究,从而使人类对钴结壳作为一种潜在资源有了真正的认识。近年来对钴结壳调查研究表明:钴结壳中钴含量经常超过1%,钴结壳还富含锰、镍、铜、铈、铂等金属,尤其是铂含量可达 2×10^{-6} ,当铂含量达 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ 时即可大幅度提高开采利润。因此,具有战略意义的钴与铂等贵金属愈来愈引起人们的关注。美国、日本、英国、法国、德国、瑞典等国均将钴列为国家战略矿产之一,有研究表明1920—1985年世界钴价分别在二次世界大战、朝鲜战争和安哥拉、赞比亚入侵扎伊尔时出现高价。研究表明,世界对钴需求以每年3%~4%速

度增长。由于海洋中钴具有陆地上钴所无法比拟的高品位优势，因而美国、德国、法国和俄罗斯等国都投入大量人力、物力和财力进行钴结壳调查研究，并已有向联合国国际海底管理局提出国际区域钴结壳资源勘探和开发进行国际立法的动议。

我国对中西太平洋海山区开展了钴结壳资源调查，随着对钴结壳资源调查研究的大量投入、调查面积不断扩大和资源数据不断采集，调查区的钴结壳资源量评价工作已基本完成。但是，对整个太平洋钴结壳资源评价尚属首次，开展这方面研究工作的目的，一是为了调查区资料与整个太平洋资料进行对比，在大区域总体上认识钴结壳分布规律，有利于调查区钴结壳资源评价工作顺利进行；二是对太平洋钴结壳资源总量、远景区域“知情”的情况下，分享国际区域的钴结壳资源；三是为我国积极参与联合国国际海底管理局制定国际海底区域矿产资源开发利用规章制度提供基础研究资料；四是建立钴结壳资源量计算、矿区圈定、资源评价方法。因此，开展太平洋钴结壳资源评价是一项具有现实和科学意义的基础应用研究工作。

全书共分十三章，张富元、章伟艳、朱克超、程永寿编著。各章节具体情况是：前言，张富元；第一章，张富元；第二章，张富元、章伟艳；第三章，张富元、朱克超；第四章，朱克超、张富元；第五章，张富元、朱克超；第六章，张富元、朱克超、张霄宇；第七章，张富元、朱克超、章伟艳；第八章，章伟艳、张富元；第九章，章伟艳、张富元；第十章，张富元、章伟艳、朱克超；第十一章，章伟艳、张富元；第十二章，张富元、章伟艳、张霄宇、倪建宇、赵宏樵；第十三章，程永寿、章伟艳、张富元；后记，张富元。

本著作写作过程中得到了国家科学技术部、国家海洋局、中国大洋矿产资源研究开发协会、国家海洋局第二海洋研究所、国家海洋局海底科学重点实验室、国家海洋信息中心、国土资源部广州海洋地质调查局的大力支持，同时也得到了陈毓川、金翔龙两位院士的精诚指导；对张海生、郑连福、李家彪、郭世勤、李裕伟、许东禹、陈邦彦、梁德华、杨胜雄、何高文、殷汝广、吕文正、林长松、初凤友、黎明碧、冯旭文、陶春辉、韩喜球、武光海、高水土、马维林各位研究员的支持和热忱帮助，借此机会向他们表示衷心感谢，同时我们也十分感激参加太平洋钴结壳资源调查人员的辛劳工作。

钴结壳资源评价涉及面广，所涉及的专业主要有海洋地质学、地球物理学、地球化学、地质统计学、环境科学、计算机科学、矿物学、联合国海洋法公约等，作者对有些专业水平有限，不妥之处，敬请各位专家批评指正。

目 次

第一章 钴结壳资源调查研究概况	(1)
第一节 钴结壳资源全球分布概况	(1)
第二节 钴结壳资源国内外调查概况	(2)
第二章 钴结壳资源评价的基本理论与方法	(8)
第一节 钴结壳资源评价的基本概念和理论基础	(8)
第二节 钴结壳资源评价的基本方法	(11)
第三章 钴结壳资源评价的数据和术语	(15)
第一节 钴结壳资源评价的数据	(15)
第二节 原始数据的转换、补齐和均匀性	(19)
第三节 数据的可靠性和代表性	(21)
第四节 术语和界定	(23)
第五节 联合国矿产资源储量分类框架	(25)
第四章 太平洋区域地质特征	(28)
第一节 太平洋板块构造	(28)
第二节 西太平洋区域地质	(29)
第三节 太平洋区域地层及火山活动	(34)
第四节 区域岩石地球化学	(41)
第五章 钴结壳年龄、生长速率和成因	(47)
第一节 钴结壳年龄	(47)
第二节 钴结壳生长速率	(51)
第三节 钴结壳成因	(55)
第六章 钴结壳地球化学	(58)
第一节 钴结壳元素组成和含量	(58)
第二节 钴结壳稀土元素组成和分布模式	(64)
第三节 钴结壳磷酸盐化作用和新老壳层化学成分差异	(67)
第四节 钴结壳元素富集系数和大洋金属物质的来源	(70)
第七章 钴结壳矿物学	(74)
第一节 钴结壳构造和物理特性	(74)
第二节 钴结壳矿物学	(77)
第三节 钴结壳矿物含量的区域变化	(79)
第四节 基岩与钴结壳出现率、丰度、品位关系	(87)
第八章 钴结壳资源的分形分析	(89)
第一节 钴结壳资源分布与水深关系	(89)
第二节 钴结壳资源分布与坡度关系	(93)

第九章 克立格法和神经网络分析 (99)

 第一节 克立格法 (99)

 第二节 勘查网度和误差分析 (107)

 第三节 神经网络分析 (110)

第十章 钴结壳资源分布规律和矿区参数指标 (114)

 第一节 钴结壳资源分布规律 (114)

 第二节 钴结壳矿区参数指标 (124)

第十一章 钴结壳资源量计算和矿区圈定方法 (127)

 第一节 钴结壳资源量计算传统方法 (127)

 第二节 克立格法 (130)

 第三节 分形法 (132)

 第四节 神经网络法 (135)

 第五节 钴结壳矿区圈定方法 (139)

 第六节 钴结壳矿区圈定和资源量计算 (140)

第十二章 太平洋海山钴结壳资源量 (143)

 第一节 太平洋海山区域分布特征 (143)

 第二节 太平洋海山结壳厚度、丰度、金属含量、覆盖率和最低含氧层深度 (146)

 第三节 钴结壳厚度与洋壳沉降深度、洋壳年龄关系 (149)

 第四节 太平洋海山面积和钴结壳资源量估算 (150)

 第五节 Co 通量与结壳 Co 沉积量和厚度的相关分析 (154)

 第六节 太平洋海山钴结壳资源远景区 (155)

第十三章 钴结壳资源评价程序设计和软件开发 (161)

 第一节 概述 (161)

 第二节 相关技术方法 (162)

 第三节 数据处理和图层制作 (165)

 第四节 软件开发 (167)

 第五节 系统集成 (172)

后记 (173)

参考文献 (176)

附图 (187)

第一章 钴结壳资源调查研究概况

第一节 钴结壳资源全球分布概况

早在 1734 年, Emmanuel 斯韦登伯格在他关于铁 (《De Ferron》) 的巨著中, 对铁锰结核成因作了首次陈述, 正确地把铁锰结核的形成归因于从土壤和有机质中析离出来的富铁锰溶液的沉淀作用结果。1873—1876 年“挑战者”号考察船在环球探险中发现了大洋铁锰结核和铁锰结壳。“挑战者”号不但从很深处 (水深 4 500 ~ 6 000 m) 用拖网获得传统的黑色铁锰结核, 而且还从水深很浅地方 (浅于 370 m) 发现了各种各样的铁锰氧化物结壳和结皮。“挑战者”号上化学家布坎南 (Buchanan J Y) 和他的同事分析证明了那些样品中含有重要的微量元素 Cu、Ni、Co, 后来又发现 Th、Tl 元素, 之后 60 年没有对铁锰结核和铁锰结壳资源作进一步调查研究。

20 世纪 70 年代末钴结壳和铁锰结核才被区分开, 过去把钴结壳称为海山铁锰结核。但是, 铁锰结核和钴结壳除形状不同外, 它们之间确实还有许多方面明显差异。铁锰结核以表层沉积物上岩石碎片、骨屑或老结核碎片为核, 由水成过程和成岩过程形成。钴结壳由海底周围海水沉淀而成, 或在热液喷口区如在大洋扩张轴、火山岛弧和火山热点附近, 由水成和热液混合成因而成。钴结壳在洋盆底坚硬基底岩石上到处都有。它们形成于海山、海脊、台地和海丘的顶部和侧翼, 那里的岩石上沉积物被海流冲掉, 导致至少数百万年的沉积间断。在岩石露头上形成厚结壳, 或在碎石堆上形成结壳皮。钴结壳中 Fe 和 Mn 含量相当, 与岩石圈和海水浓度相比, 特别富集 Mn、Co、Pb、Te、Bi 和 Pt。钴结壳具有两个非常重要的意义, 一是潜在资源的经济价值, 二是记录了过去 60 ~ 100 Ma 的海洋和气候历史。

从北部的阿留申群岛海沟到环南极海岭的太平洋海山都发现了钴结壳。但是, 对赤道太平洋钴结壳的研究最详细, 这些结壳大多数采自西太平洋的威克 - 马尔库斯海山区、麦哲伦海山区、中太平洋海山区的国际水域, 密克罗尼西亚联邦、马绍尔群岛、莱恩群岛、基里巴斯和美国 (夏威夷、约翰斯顿岛、加利福尼亚岸外) 专属经济区 (Exclusive Economic Zone) (图 1-1)。太平洋估计有 8 000 多个海山, 与太平洋相比, 大西洋和印度洋海山很少, 那儿大多数钴结壳都与海底扩张脊有关。与扩张脊有关的钴结壳, 通常含有非常靠近活动火山口的热液组分, 而扩张脊钴结壳区域一般较小, 只占沿洋脊形成钴结壳的 30% 以下。那些水成 - 热液成因钴结壳, 通常沿西太平洋活动火山岛弧、西太平洋和西南太平洋弧后盆地扩张脊、南太平洋和东太平洋扩张中心、中太平洋 (夏威夷) 和南太平洋 (皮特克思岛) 的活动热点分布。太平洋 8 000 多个海山中进行过海底地形图详细绘制和钴结壳采样的海山所占比例小于 15%。

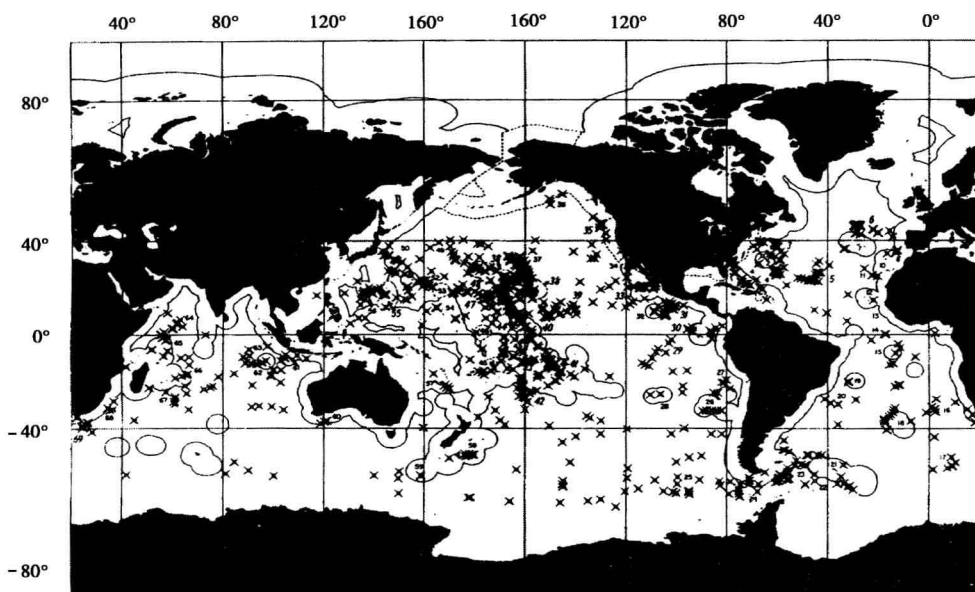


图 1-1 世界大洋钴结壳分布图^[1]

第二节 钴结壳资源国内外调查概况

大洋多金属结核的潜在经济利益在 20 世纪 60 年代早期就引起 Mero J L^[2] 的注意，后来由许多世界财团发起的海洋勘探发展成为大规模的国际性多金属结核调查勘探活动，并于 20 世纪 70 年代中期海洋勘探达到顶峰。20 世纪 70 年代人们认识到钴结壳的潜在经济价值，并把钴结壳与多金属结核区分开。1981 年，德国 Clausthal-Zellerfeld 技术大学的 Peter Halbach 教授主持“太阳”号第 1 个航次，对中太平洋夏威夷以南莱恩群岛钴结壳分布区域首次进行了系统调查研究。这个航次使用大型拖网，同时使用地震和海底照相系统，调查获得了惊人的发现。随后德国、美国地质调查局、夏威夷大学，鉴于对钴结壳分布和化学相互关系的认识，对中太平洋海底火山体进行勘查。

20 世纪 70 年代后期，因多金属结核资源位于国际海底区域使问题复杂化，导致对开采多金属结核做出积极准备的商业财团撤出了资金。沿海国家（200 海里）专属经济区内钴结壳的大量发现，激起了对国家管辖区内矿物资源的兴趣。钴结壳资源不仅仅是太平洋海山区的钴结壳矿床，还包括被海流冲刷刷光碎屑沉积的大陆边缘阶地上的钴结壳资源。

20 世纪 70—80 年代对铁锰矿物进行系统调查研究的还有日本，日本地质调查局组织了一系列调查航次，他们主要针对深海铁锰结核矿床，对钴结壳研究主要集中于日本专属经济区（伊豆诸岛—小笠原群岛间的岛弧）和中太平洋海山。韩国开始时与美国合作，开展钴结壳调查研究。目前参与大洋钴结壳资源调查研究的国家有德国、美国、俄罗斯、法国、日本、中国、韩国、新西兰、澳大利亚等。

德国是目前世界上进行海洋矿产资源调查研究最积极的国家之一，其勘查活动主要是在政府的资助下进行，1981—1985 年德国实施了为期 5 年的“中太平洋锰结壳调查计

划”，对中太平洋海山区、莱恩群岛、夏威夷群岛附近海山作了多次调查^[3-4]。有关钴结壳矿产资源研究突破性进展是在1981年进行的“中太平洋-1”勘查期间取得的，这次考察在原联邦德国 Clausthal-Zellerfeld 大学的 Halbach 教授领导下进行，考察证实了太平洋存在较大范围内的具有经济潜力的钴结壳矿床，并首次提出其中 Co 等金属巨大潜在的经济价值^[5]。随后，相继进行了一系列航次的调查，对太平洋海域的钴结壳资源分布、地球化学特征及其成因作了系统研究。研究表明在水深 1 100 ~ 2 000 m 的区域内 Co 含量经常超过 1%，最高可达 2%。在水深小于 2 500 m 的整个海山坡上，所含金属的质量和价值明显大于此区域中相应的深海锰结核矿区中金属的质量和价值。1981 年，德国率先对中太平洋的钴结壳进行实地航次调查，1984—1986 年又相继在中太平洋海盆的专属经济区继续进行勘查和研究，后与美国合作，共同开展此项调查研究工作^[6]。

美国夏威夷地球物理研究所的科学家们在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初对夏威夷群岛海域的钴结壳资源作了调查。1981 年德国在中太平洋钴结壳资源的勘查结果引起了美国的重视。美国地质调查局在德国勘查基础上于 1983—1984 年对太平洋、大西洋等海域进行了一系列航次的钴结壳资源调查研究，特别是对中太平洋海山做了非常详细的调查^[1]。1986 年又对约翰斯顿环礁南部太平洋进行调查，发现整个夏威夷群岛—约翰斯顿环礁及其他岛屿周围海域蕴藏着相当大的钴结壳资源，尤其是在水深 800 ~ 2 400 m 处最为集中。据估算，仅夏威夷群岛、约翰斯顿环礁专属经济区中就有 5 万多平方千米的海山具有远景，拥有 3 亿多吨钴结壳资源潜力^[1]。美国太平洋区域蕴藏着含 Co 丰富的钴结壳资源，以 20 世纪 80 年代中期的消费量计算，可供美国几百年的消费，还可提供大部分的铂需求。在大西洋西部，美国东南海岸外的某些区域亦有丰富的钴结壳资源^[113]。美国于 1983 年起积极开展钴结壳的勘查和研究。美国地质调查局、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 10 多个航次调查。目前，美国已初步完成夏威夷钴结壳的开采、运输、冶炼及加工等各项准备工作，同时仍在继续深入开展此项工作。

日本对大洋钴结壳资源的调查研究十分积极，1982 年在日本金属开采机构及 48 家私营企业的捐助下成立了深海资源开发公司（DORD），调查深海矿产资源，日本政府为其提供了 80% 经费。日本首次大洋钴结壳资源调查是 1985 年由东海大学海洋学部和资源协会在南鸟岛海域进行。1986 年作为热液矿床调查的一部分，地质调查所又在伊豆—小笠原海域及周围海域开展了钴结壳资源调查。1987 年通产省委托金属矿业事业团在西太平洋海域进行了钴结壳的勘查活动，深海矿产资源开发公司也参加了多次勘查活动。从 1985 年起，金属矿业事业团还应南太平洋应用地球科学委员会（SOPAC）的邀请，参加了该委员会成员国海洋矿物资源基础调查，以勘探和评价各加盟国家专属经济区内包括钴结壳在内的深海矿产资源，获得了有关钴结壳矿床的很多成果。据 1993 年 10 月 15 日《读卖新闻》报道，日本通产省工业技术院已着手开发海底钴结壳矿床，方案将分阶段进行，计划 1994 年度着手摸索开采技术，1997 年在南太平洋进行试开采。日本于 1982 年起由日本深海资源开发公司、日本地质调查局、东京大学海洋研究所等单位组织实施对西太平洋钴结壳资源进行勘查和研究，估计其投入的经费不少于美、德等国的总和。目前，日本正积极开发钴结壳资源的开采技术，并计划在西太平洋海域进行试采。

俄罗斯同西方发达国家一样，对钴结壳资源的兴趣大于多金属结核，尽管俄罗斯金属资源丰富，但从未中断过对海洋矿产资源的调查活动，1982 年苏联科学院海洋研究所在

大西洋进行了钴结壳调查，随后地质部在麦哲伦海山区继续调查。俄罗斯对钴结壳有计划调查研究开始于1987年对中太平洋海山区调查，主要研究水下海山及露出水面海山，并得出水下海山钴结壳资源较好的结论。此后，俄罗斯对麦哲伦海山区钴结壳进行了长达6年的研究，认为麦哲伦海山区比中太平洋海山区更具优势：麦哲伦海山区平顶山多，尖顶海山少，而且钴结壳多在有利的水深产出（麦哲伦海山区有经济价值的钴结壳资源位于水深1 000~3 000 m，而中太平洋海山区仅至2 500 m）；麦哲伦海山区结壳的Co含量0.5%~0.6%，虽然略低于中太平洋海山区，但是钴结壳厚度比中太平洋海山区大一倍，麦哲伦海山区的钴结壳覆盖率高而且丰度大。经过一系列的调查工作后，俄罗斯已在太平洋、大西洋、印度洋发现了大量的钴结壳资源，并已准备向联合国海底管理局提出2个海山钴结壳资源申请矿区，均位于麦哲伦海山区。俄罗斯于1986年将海洋矿产资源勘查重点由大洋多金属结核转向钴结壳。至1996年，在西太平洋国际海域已完成了24个航次的调查研究。其投入费用之多，调查范围之广，研究程度之深为其他国家所少有。

韩国海洋研究和开发研究所（KORDI）早在1983年就在韩国政府支持下进行了大洋矿产资源勘查工作，1989—1991年还与美国地质调查所开展合作，对西太平洋钴结壳的商业前景进行了3个航次考察评价，预计近几年内，还将进行大洋矿产资源勘查活动。现正积极组织技术力量，准备着手独立开展此项工作。

从20世纪80年代开始，德国、俄罗斯、美国、法国、澳大利亚、韩国和日本等国都投入大量人力、物力、财力进行钴结壳资源调查研究，并对钴结壳的分布、类型、成矿特征、成矿环境和形成模式等问题，在宏观和微观上进行了深入调查与研究，对商业化开采的关键技术也进行了开发。1981—2002年各国对太平洋钴结壳资源调查航次和调查区域见表1-1和图1-2，由此可以看出，各国调查区域主要位于太平洋的各国专属经济区内，少部分位于国际水域。目前，美国等西方国家正利用已经形成的技术优势，积极探索和研究大洋钴结壳资源的勘查开发及冶炼加工技术，在深海勘探领域保持领先地位。

表 1-1 1981—2002 年各国太平洋钴结壳资源调查航次^[7,223]

调查船/航次	时间	机构	专属经济区/海区
Sonne/SO18	1981	TUC	美国：约翰斯顿岛、金曼-巴尔米拉礁；基里巴斯-莱恩群岛
S. P. Lee/L5-83-HW	1983	USGS	美国：夏威夷、约翰斯顿岛、金曼-巴尔米拉礁
Sonne/SO33	1984	TUC	美国：夏威夷、约翰斯顿岛、金曼-巴尔米拉礁
S. P. Lee/L9-84-CP	1984	USGS	马绍尔群岛
Kana Keoki/KK84-04-28-05	1984	UH	美国：夏威夷群岛
Kana Keoki/KK84-04-28-05	1984	UH	美国：夏威夷群岛
Sonne/SO37	1985	TUC	美国：豪兰-贝克岛、约翰斯顿岛
Sonne/SO46	1986	TUC	美国约翰斯顿岛；马绍尔群岛
Farnella/F7-86-HW	1986	USGS/BOM	美国：约翰斯顿岛
Jean Charcot/NODCO 1	1986	IFREMER	法属玻利尼西亚群岛
Tui/Tripartite II	1986	NZOI	库克群岛
Moana Wave/MW-86-02	1986	UH	基里巴斯-菲尼克斯群岛；图瓦卢群岛
Moana Wave/MW-87-02	1987	UH	库克群岛；基里巴斯-莱恩群岛
?	1987	USSRAS	国际海域：东马里亚纳海盆

Hakurei Maru II/many	1980 - 1990	MMAJ	夏威夷和日本之间国际海域
Hakurei Maru II/?	1987	MMAJ	基里巴斯 - 菲尼克斯群岛
Farnella/F7 - 87 - SC	1987	USGS	美国：加利福尼亚岸外
Hakurei Maru II/?	1988	MMAJ	图瓦卢群岛
Rapuhia	1988	NZOI	新西兰
Akademik Nikolai Stakhov	1988	USSRAS	国际海域：东北大西洋
Hakurei Maru II/?	1989	MMAJ	基里巴斯 - 莱恩群岛
Farnell/F10 - 89 - CP	1989	USGS/KORDI	马绍尔群岛
Hakurei Maru II/?	1990	MMAJ	萨摩亚群岛
Farnella/F11 - 90 - CP	1990	USGS/KORDI	密克罗尼西亚联邦
Farnella/F7 - 91 - WP	1991	USGS/KORDI	密克罗尼西亚联邦；帕罗群岛
Hakurei Maru II/?	1991	MMAJ	基里巴斯 - 吉尔伯特群岛
调查船/航次	时间	机构	专属经济区/海区
Vinogradov/91 - AV - 19/2	1991	RAS/USGS	美国：约翰斯顿岛
Rig Seismic/BMR107	1992	AGSO	澳大利亚 - 圣诞岛
Sonne/SO83	1992	FUB	东北大西洋国际海域
Rig Seismic/147	1995	AGSO	澳大利亚 - 塔斯马尼亚岛
Hakurei Maru II/?	1995	MMAJ	汤加
Hakurei Maru II/?	1996	MMAJ	马绍尔群岛
Hakurei Maru II/?	1997	MMAJ	密克罗尼西亚联邦
Onnuri/KODOS 97 - 4	1997	KORDI/USGS	马绍尔群岛
Hakurei Maru II/?	1998	MMAJ	密克罗尼西亚联邦；马绍尔群岛
Onnuri/KODOS 98 - 3	1998	KORDI/USGS	马绍尔群岛；密克罗尼西亚联邦
Onnuri/KODOS 99 - 1	1999	KORDI	马绍尔群岛
Onnuri/KODOS00 - 3	2000	KORDI	国际海域：马绍尔群岛的几个岛屿
Onnuri/KODOS01 - 2	2001	KORDI	国际海域：马绍尔群岛的几个岛屿
Hakurei Maru II/SOPAC02	2002	MMAJ/JICA	马绍尔群岛

TUC：德国 Clausthal 技术大学；USGS：美国地质调查局；UH：夏威夷大学；BOM：美国矿业局；IFREMER：法国海洋开发研究院；NZOI：新西兰海洋学院；USSRAS：苏联科学院；MMAJ：日本金属矿业处；KORDI：韩国海洋研究发展学院；RAS：俄罗斯科学院；AGSO：澳大利亚地质调查组织；FUB：柏林自由大学；FSM：密克罗尼西亚联邦政府。

中国是一个发展中国家，也是一个海洋大国，为维护我国在开发国际海底区域矿产资源活动中的应有权益，并分享国际海底资源这一全人类共同继承的财产，中国也积极地开展了海洋矿产资源调查研究。中国陆地锰、铜、钴、镍等矿产资源人均储量远低于世界平均水平，随着我国国民经济发展，这些矿产资源短缺的矛盾日益突出，为填补陆地矿产资源不足，满足国民经济可持续发展的需要，开发海洋资源势在必行。20 世纪 80 年代初，我国开始对大洋多金属结核资源进行调查研究，先后在中太平洋、北太平洋和西太平洋进行了气象、水文、地质地球物理和环境调查研究。1991 年我国在联合国海底管理局登记为“深海采矿先驱投资者”国家，并在东太平洋获得了 $7.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的多金属结核勘探区。20 世纪

90 年代中期，在西方国家纷纷把注意力转向大洋钴结壳资源勘查之时，我国也从多金属结核资源调查为主及时转向以钴结壳资源调查为主，对西太平洋海山区进行了钴结壳资源调查（图 1-3），开展了多波束海底地形测量、磁力、海底摄像、海底照相、拖网、浅地层剖面、CTD 测量和地质采样工作。

综合分析世界各国大洋矿产资源调查研究经历，可以看到，无论是大洋多金属结核还是钴结壳资源调查研究历史，一开始为环球探险偶然发现，进而出于科学好奇和基础研究为目的的进行科学考察，发现这些矿产资源的潜在经济价值，从而导致以国家权益和商业利益考虑开展大规模的勘探开发过程，最终以向联合国海底管理局申请矿区的形式分享这一海洋矿产资源。大洋多金属结核资源调查范围从大西洋、印度洋、太平洋三大洋开始，慢慢地汇集到南太平洋、东北太平洋、赤道太平洋，最后聚集在太平洋克拉里昂 - 克利伯顿（Clarion-Clipperton Zone, CC 区）区域，而目前对钴结壳资源调查研究集中在中、西太平洋，这说明太平洋海底矿产资源富集区的地质条件特别，海底矿产资源富集是板块构造、热点、地形、生物化学、水层结构、底流、沉积作用等诸多成矿因素的相互作用结果。

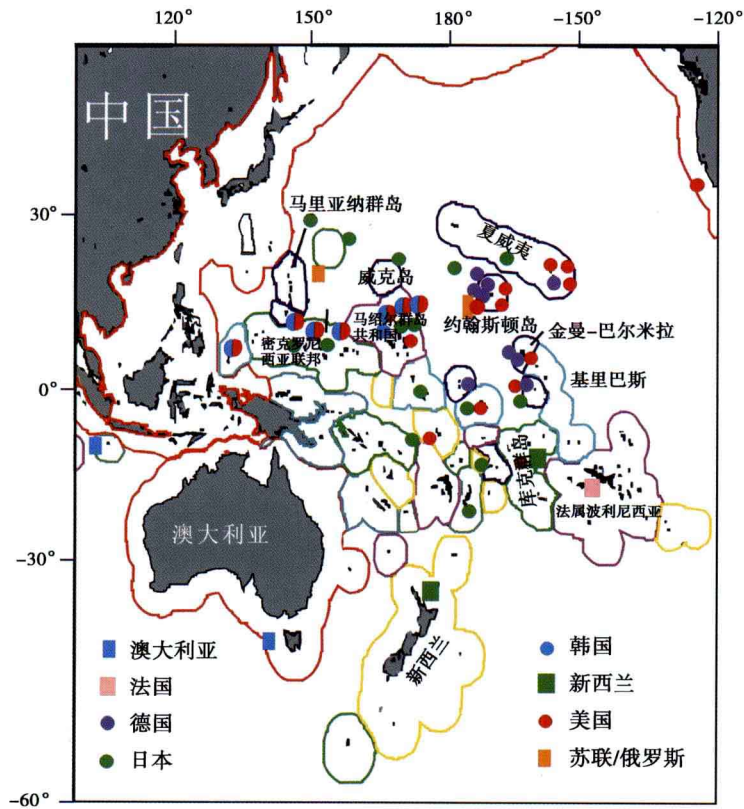


图 1-2 1981—2002 年太平洋钴结壳资源调查区域和 200 海里专属经济区分布^[7,223]

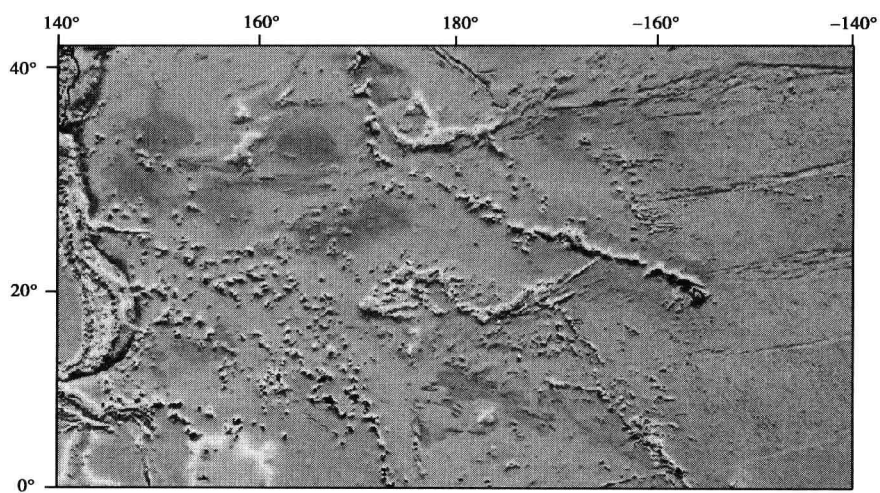


图 1-3 西太平洋中国钴结壳资源调查区域分布示意图^[8~9]

第二章 钴结壳资源评价的基本理论与方法

第一节 钴结壳资源评价的基本概念和理论基础

一、钴结壳资源评价的基本概念

自地球科学形成以来,地质学家们一直在探索矿产资源评价问题。从大的方面来说,矿产资源评价是对地壳内各种矿产蕴藏量进行估算并对其实用价值作出推测,属于地质调查工作的发展战略内容的组成部分,并在研究和认识地质规律的基础上,用地质理论和可能的技术方法(地质的、物化探的、数学地质的),指出现在还没有发现而将来可能或应当被发现的矿产蕴藏量或矿藏,并对它的质和相应的量作出评价,还需对蕴藏量在当前和未来的社会政治和经济发展趋势的作用作出预测。因此,矿产资源评价是一门综合性很强的实用地球科学,它涉及地学的各个方面和计算机信息技术。矿产资源评价也是地质理论、资料搜集和整理、评价方法、评价设备、矿产品生产和技术经济条件之间联接的过程。

钴结壳资源评价是矿产资源评价的一个新的组成部分,因此上述矿产资源评价基本概念同样适合于钴结壳资源评价。但是,由于矿产资源成因和所处地理位置不同,大洋矿产资源与陆地矿产资源这两者之间既有共性又有差异,钴结壳资源是分布于海山表面的一种矿藏,因被厚厚的海水覆盖,对其调查和勘探的难度大,调查精度相对较低,目前钴结壳资源评价主要是利用大量的实际调查得到的地质、地球物理、生物化学、水文气象和沉积环境、钴结壳资源等数据资料,结合经济、政治、法律、技术的客观条件,彼此联系起来进行资源评价和估算矿产资源量。我国钴结壳资源调查区的资源评价主要是利用调查区内的所有调查研究资料进行资源评价,其主要目的是圈定出钴结壳矿区和建立起大洋矿产资源评价体系。

二、钴结壳资源评价的理论基础

矿产资源评价基本内涵是人们把观测到的数据资料转化为矿产资源量。由于过去对地质研究程度不够,技术条件不足以及经济发展对矿产资源量的供求矛盾尚不突出,矿产资源评价方法和评价设备等诸多实际问题尚未得到解决,矿产资源评价主要是通过地质人员的主观分析,凭借有限的经验和公式预测矿产资源量。20世纪50年代后,电子计算机在地学中的应用不断扩大,具备了搜集综合大量各类信息资料和建立起社会政治经济发展与矿产资源关系的能力,加上矿产资源评价方法的研究^[10]也有了重大突破,随之而来的便是矿产资源评价飞速发展。矿产资源评价理论基础也不断发展与完善,归纳起来,矿产资源评价理论主要有以下几方面。

(一) 地质条件类比的理论

在一定地质条件下产出一定的矿床,相似地质条件下赋存有类似的矿床,这是 Harris D P^[11~12]建立矿产资源同地质环境之间的定量关系的理论指导原则。在此理论原则的指导

下，矿产资源评价采用“由已知到未知”的原则，即利用在已知区矿产资源量与地质条件之间建立的评价模型，外推到未知区，最终目的是获得未知区矿产资源量。钴结壳资源调查主要是通过定点地质采样获得观测点的钴结壳资源量，用该观测点已知的资源情况（厚度和品位）推测其周围邻区的资源分布。然后，再利用海底照相、电视抓斗、浅钻等可视性探测技术作连续的剖面观测，与地质采样结果进行比对和校验。

（二）地质变量的综合和分解的理论

地质变量是建立矿产资源评价模型的基础，各种原始地质数据的综合利用使各种地质信息集中地反映到事物的本质，一般认为综合地质特征（钴当量丰度）比单个特征能提供更多的信息。另一方面，矿产资源评价最感兴趣的是从一系列地质变量中分解出各个地质变量的特有行为，特别是与矿产资源成因有关的行为（如钴结壳中的钴含量与海山水深关系极为密切），这就是矿产资源评价中变量分解的意义。无论是对变量的综合还是对变量的分解，数学地质和计算机技术的完美结合提供了解决这些问题的技术和方法。

（三）地质解释的理论

地质解释就是把观测资料 and 理论模型转变为地质成因和资源特征。无论是人们直接的利用观测到的数据资料，还是利用经数学地质方法和计算机技术处理后数据来解释地质现象，最终都离不开地质人员的主观知识和经验。地质解释的理论意义在于用评价人员所掌握的地质理论和积累的经验，补充矿产资源评价模型没有包括的那部分信息，进一步修改和完善评价模型不真实的部分，最后把它转化为地质意义和矿产资源量的概念。

矿产资源评价是地质工作的主要组成部分，它与国民经济可持续发展有着密切联系，历来受到国际组织和各国政府重视。1976年在挪威和1979年在墨西哥召开的国际地质协调计划会，对矿产资源评价的理论和方法进行了全面总结（区域价值估计法、体积估计法、丰度估计法、矿床模拟法和综合法等）和推广应用后获得了快速发展。为了保证矿产品、矿产资源和能源的近期、中期和长期供给的需要，多数发达国家把矿产资源评价工作作为一项基本国策来考虑。几十年来，通过不断探索和实践，已形成了一套完整的矿产资源评价方法，并初步建立起矿产资源评价的理论体系。

矿产资源评价有两种基本形式，即总和式和非总和式估计。总和式估计是资源总量的估计，其目标是预测矿床的个数和资源总量。非总和式则要求在总量估计的同时，在0.05 ~ 0.95概率范围内估计矿床个数、位置、质量和数量。到目前为止，钴结壳资源调查精度，应该说还是资源量水平，而不是计算储量阶段，因此钴结壳资源评价是总和式估计。

（四）板块构造理论

钴结壳厚度取决于生长年龄和生长速率，而板块构造理论的重要成果能预测洋底年龄（图2-1），能说明洋底年龄和海山年龄的变化，因此，钴结壳资源评价必然涉及板块构造。根据板块构造理论，地球上层由岩石圈和软流圈组成，板块彼此之间以及与下伏的低强度的软流圈之间发生相对运动，在大洋中脊，产生新岩石圈，离洋中脊距离越远洋底年龄越大，在海沟附近，岩石圈沿消减带消失，板块下沉到相当深的上地幔。集大陆漂移与海底扩张为一体的板块构造理论非常有效地解释地球上的许多特征，很好地解释了那些位于板块边界的大部分火山的形成和分布。但是不能解释发生在远离板块边缘地方的板内火山活动，包括许多海山和火山岛。

（五）热点理论

板块构造理论对于那些位于板块内部的大量海山^[2,13]不能作出很好的解释，因此，

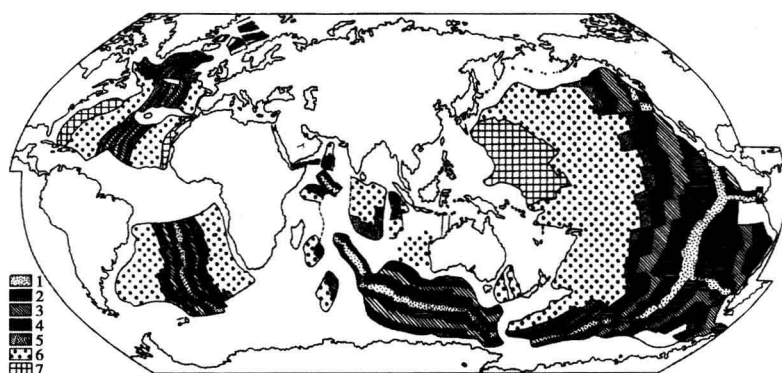


图 2-1 世界洋底年龄图^[125]

1 - 更新世 - 上新世; 2 - 中新世; 3 - 渐新世; 4 - 始新世; 5 - 古新世; 6 - 白垩纪; 7 - 侏罗纪

Wilson大胆地提出了热点的概念^[14]，把海山链和下伏地幔对流联系起来解释夏威夷群岛等众多洋底海山的形成过程。20 世纪 90 年代，开始把热点与地幔柱研究相结合，从而演化为热点 - 地幔柱理论，成为当今地球科学前沿领域最有发展前景的研究方向之一。热点理论很好地解释了洋底海山形成、板块内部的火山和构造活动，阐明了海山定向排列和年龄递变现象，为海底钻结壳形成与演化提供重要的基础资料，从理论上讲，海山一旦形成，钻结壳就开始直接生长在下伏的海山基岩或沉积物表面上。地球上约 90% 的火山活动发生在板块会聚带或离散带的内部或附近，10% 左右的火山活动发生在远离板块边缘的地方，包括许多海山和火山岛。在四大洋中以太平洋中这类海山最多，约占总海山数的 53%，它们或以链状分布，或聚集成群，如天皇 - 夏威夷群岛、莱恩群岛、麦哲伦海山区、中太平洋海山区、马尔库斯 - 威克海山区。由一系列火山锥形线状展布构成的海山链，其海山岩石年龄的分布具有明显的定向性，要比邻接的洋底基岩年龄小得多，而且是由新到老依次排列的，如夏威夷海山链上的海山年龄变化（图 2-2）。

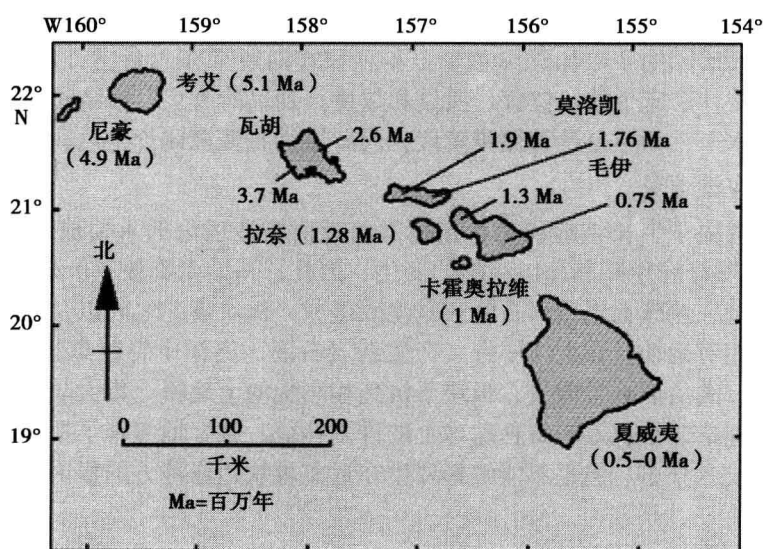


图 2-2 夏威夷海山链上热点成因的海山年龄变化