

锰质核形石

大洋多金属结核

陈建林等 著



964



海洋出版社

锰质核形石——大洋多金属结核

陈建林 等 著

海洋出版社

2002 年 · 北京

内 容 简 介

本书主要研究内容有:大洋多金属结核成因研究简史、结核粒径分形特征、锰质叠层石分类及其化学与生物矿物学特征、建造多金属结核的超微生物化石种、叠层石纹层与超微生物关系、叠层石纹层的韵律周期、锰质叠层石柱体的构筑以及人工 1nm 锰矿相的金属阳离子交换能力与结构稳定性的研究等。认为大洋多金属结核是核形石的一种新类型——锰质核形石,它是超微生物千百万年世代繁衍的结果。在此基础上对多金属结核进行新的分类。本书中还简要介绍了通过对海洋深处不同种类细菌的生理生化研究,以探讨其对多金属结核形成的影响。此外,还提出了集矿机设计的初步设想。全书共分十一章。本书可供从事多金属结核(结壳)开发研究的海洋、地质、冶金部门及大专院校等人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

锰质核形石:大洋多金属结核/陈建林主编;马维林
等编著. —北京:海洋出版社,2002.8
ISBN 7-5027-5533-0

I. 锰... II. ①陈...②马... III. 锰结核—研究
IV. P744.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 059151 号

责任编辑:赵叔松
特邀编辑:陈荣发
责任校对:张丽萍
责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

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

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:10.5

字数:262 千字 印数:1~400 册

定价:30.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

大洋多金属结核是一种重要的海底矿产资源,其储藏量巨大,富含多种有用金属。国际海底(AREA)中的大洋多金属结核资源备受世界的普遍关注,已纳入联合国海底管理局的管辖范围之内。大洋多金属结核虽然是海洋中可供开发利用的重要资源,但其成因并不清楚,尚处于探讨之中。在长达一个多世纪的研究探讨中,科学家们提出了各种可能的成因机制,试图解释多金属结核的形成原因,以便指导找矿和评价资源。据国内外的有关报道,大多主张多金属结核的成因为胶体化学成因,并承认微生物对结核的形成也有一定的作用,因而胶体化学成因论长期主导着多金属结核成因的认识。

《锰质核形石——大洋多金属结核》是作者们多年来深入研究的结晶。他们付出了艰辛的劳动,取得了有意义的科学成果,认为大洋多金属结核是一种锰质核形石,从而提出东太平洋多金属结核是超微生物建造体的新观点,丰富了大洋多金属结核成因研究的思想库。该书讨论了锰质叠层石及其建造者(超微生物化石)之间的关系,探讨了叠层石纹层的构筑、叠层石体内的矿物和化学特征、金属阳离子间的交换,以及活体微生物对结核成矿作用的影响等。《锰质核形石——大洋多金属结核》一书的出版将有助于推动大洋多金属结核成因的研究,使人们对大洋多金属结核的本质有更深一个层次的了解。



前 言

大洋多金属结核(国外一般用“锰结核”一词)以其富含多种有用金属元素而为世人所日益重视。1873年英国的“挑战者”号科学考察船在大西洋洋底首次发现的锰结核,已成为当今世界上一些大国开发海洋的重要“黑色资源”。近十余年来,我国多次在太平洋国际海底成功地进行了多金属结核资源勘查,基本上探明了在中国开辟区内多金属结核的丰度、品位、储量及其分布特点,并开展了相关课题的研究,取得了许多重要成果。然而对其成因的研究,虽经国内外地质工作者几代人的探索,却仍未取得共识。一般认为多金属结核是胶体化学成因的,其内部纹层构造是沉积动力学形成的机理。随后一些学者进一步指出,微生物在结核形成过程中起着重要的影响作用。众说纷纭的现状表明,多金属结核成因仍是一个“谜”。

为了对多金属结核成因作进一步研究,中国大洋矿产资源研究开发协会在“八五”期间开发研究项目中设立了“勘探区多金属结核矿物特征与形成机制研究”专题(编号DY85-02-02-02),我们承担了这一项目,并与南京大学现代分析中心共同协作完成。通过以透射电子显微镜为主要手段的系统研究,发现大洋多金属结核是核形石的新类型,其内部构造是叠层石构造,纹层内聚集着纳米级的微生物(化石),并呈现规律性分布。据此,首次提出了多金属结核是生物岩的新观点。此后,我们又在“九五”期间立项的“中国开辟区多金属结核生物成因研究”课题(编号DY95-02-12)中,对锰质叠层石及其建造者(超微生物)在结核中显示的韵律性特征,叠层石纹层与超微生物生长的关系,以及超微生物成矿作用等进行了深入的研究,其结果进一步确立了大洋多金属结核的生物成因观点。这一认识与“微生物的重要影响”有着本质上的区别,即建构多金属结核的基本“框架”是由超微生物搭建起来的。我们提出的大洋多金属结核是生物岩——锰质核形石的观点,从某种意义上讲,揭示了多金属结核形成之“奥秘”。本书内容主要是建立在上述两个研究课题资料的基础上整理而成的,并增加了部分新的研究成果。

全书由集体编撰而成,共分为十一章,各章节分工编写情况如下:前言,陈建林;第一章,陈建林;第二章第一节,沈华悌;第二章第二、三、五节,陈建林;第二章第四节,陶春辉、陈建林;第三章第一节,陈建林、林承毅、边立曾;第三章第二、三节,林承毅、边立曾、张富生、陈建林;第四章,张富生、边立曾;第五章第一、二节,林承毅、边立曾;第五章第三节,韩喜球;第六章,史君贤;第七章第一、二节,陈建林、马维林;第七章第三节,陈建林;第八章第一节,陈建林、张富生、林承毅;第八章第二、三节,陈建林;第九章,钱江初;第十章,林承毅、张富生;第十一章第一、三、五节,陈建林、沈华悌;第十一章第二节,史君贤;第十一章第四节,张富生;结论,陈建林。最后由陈建林负责统编完稿。

在对锰质叠层石和超微生物化石的鉴定与课题成果的评审中,得到了国内专家徐克勤院士、王德滋院士、李廷栋院士、金翔龙院士、曹瑞骥研究员、金建才主任、郭世勤总工、兰玉琦教授、梁玉左教授、朱上兴教授、邱树玉教授和吕文正研究员等的热情指教。在我们首次提出多金属结核是生物岩的新见解时,曾得到中国大洋矿产资源研究开发协会和国家海洋局领导的鼓励,并特地在大洋地质基础研究项目中设立了“中国开辟区多金属结核生物成因

研究”课题。中国科学院上海原子核研究所朱节清教授、王基庆硕士对多金属结核化学元素的质子探针分析予以热情协助并提供分析资料。课题负责单位国家海洋局海底科学重点实验室、国家海洋局第二海洋研究所和协作单位南京大学现代分析中心的领导与专家,对课题的研究与进展情况极为关心,使我们课题研究得以顺利进行。

国家海洋局海底科学重点实验室主任金翔龙院士、国家海洋局第二海洋研究所地质地球物理研究室主任李家彪研究员、负责大洋多金属结核项目责任科学家吕文正研究员、地质地球物理研究室副主任初凤友研究员、高水土高级工程师和海洋出版社驻浙江办事处主任陈荣发等对本书的编写和出版给予了大力支持,并具体提出了许多宝贵的意见。梁景周副编审对英文摘要进行了仔细校对。王洪法高级工程师为本书提供了大洋多金属结核调查现场的珍贵照片。

作者在此谨致谢忱!

同时,特别感谢中国大洋矿产资源研究开发协会、国家海洋局海底科学重点实验室和海洋出版社对本书出版的经费资助。

需要说明的是,关于多金属结核元素含量变化序列周期信号的谱分析,仅作为一种研究方法提出,以借此说明大洋多金属结核也与深海沉积及其他地质现象一样,其纹层韵律的变化周期有可能受控于地球公转轨道参数的周期性变化。

诚然,大洋多金属结核的成因与生长机制是十分复杂的问题,况且把多金属结核看成是锰质核形石,并认为它是超微生物的建造体,这在以往尚未见报道(除本书作者在有的刊物上发表过一些论文外),而且我们在这方面研究的时间还不长,由于受笔者水平所限,书中欠妥与疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正,更希望同行专家予以补充完善。我们相信,随着时间的推移和研究手段的创新,对大洋多金属结核成因的看法终将会达成广泛的共识。

目 次

序	金翔龙(1)
前 言	(3)
第一章 大洋多金属结核成因研究简史	(1)
第二章 区域沉积环境与多金属结核	(3)
第一节 区域沉积环境	(3)
第二节 多金属结核的特征	(8)
第三节 多金属结核分布简述	(12)
第四节 多金属结核粒径分形特征	(14)
第五节 边缘海与大洋多金属结核主要特征比较	(26)
第三章 多金属结核中的锰质叠层石	(29)
第一节 锰质核形石的由来、包壳特征与研究意义	(29)
第二节 锰质叠层石的鉴定依据	(31)
第三节 锰质叠层石的族、形特征与分布	(33)
第四章 建造多金属结核的超微生物(化石)	(39)
第一节 超微生物化石的特征	(39)
第二节 超微生物(化石)与锰质叠层石纹层的关系	(40)
第三节 两种超微生物(化石)在结核中的分布特征	(42)
第五章 锰质叠层石纹层韵律的周期	(45)
第一节 叠层石纹层的生长韵律	(45)
第二节 锰质叠层石的生长速率与纹层周期的讨论	(48)
第三节 多金属结核元素含量变化序列周期信号的谱分析	(50)
第六章 活体微生物研究	(57)
第一节 活体微生物的研究对象与意义	(57)
第二节 活体微生物的研究方法	(57)
第三节 样品中细菌数量和活体微生物的分布	(59)
第七章 叠层石纹层的化学成分特征	(63)
第一节 奇异叠层石纹层的化学成分特征	(63)
第二节 微小叠层石纹层的化学成分特征	(66)
第三节 主要成矿元素的相关性讨论	(72)
第八章 叠层石纹层中的生物矿物学特征	(75)
第一节 叠层石纹层中的铁锰矿物	(75)
第二节 铁锰矿物的生物成因证据	(84)
第三节 主要锰矿物含量变化与叠层石类型关系	(85)
第九章 人工 1nm 锰矿相的金属阳离子交换能力及结构稳定性研究	(95)
第一节 人工 1nm 锰矿相的合成	(95)
第二节 二价金属阳离子的交换实验	(96)

第三节	人工 1nm 锰矿相金属阳离子的交换能力	(99)
第四节	有价金属阳离子进入多金属结核的途径	(100)
第五节	人工 1nm 锰矿相的结构稳定性	(101)
第十章	多金属结核的新分类方案与两类结核特征	(105)
第一节	前人的分类方案及其分类依据	(105)
第二节	多金属结核的新分类方案及其分类依据	(108)
第三节	两类多金属结核的特征对比	(108)
第十一章	多金属结核的微生物成矿作用	(111)
第一节	多金属结核成因的几种观点	(111)
第二节	铁锰细菌在多金属结核形成中的作用	(112)
第三节	多金属结核中元素存在形式与物源问题	(115)
第四节	多金属结核的微生物成矿证据	(118)
第五节	锰质叠层石柱体的构筑及其他	(120)
结 论		(127)
英文摘要		(129)
图版说明		(133)
参考文献		(135)
图 版		(145)

第一章 大洋多金属结核成因研究简史

大洋多金属结核的首次发现,在许多文献中均有报道。早在1873年英国的“挑战者”号海洋科学考察船在大西洋洋底即采集得锰结核(多金属结核),因其锰元素含量高而得名。此后,世界上一些经济比较发达和技术力量颇为雄厚的国家先后在太平洋和印度洋也发现有结核分布。这些国家主要有:美国(“信天翁”号船:1899~1900年及1904~1905年,三大洋;“达乌维特”号船:1958年,太平洋)、瑞典(1947~1948年,太平洋)、前苏联(“勇士”号船:1957~1961年,太平洋)、日本(“白岭丸”、“望星丸”、“东京大学丸”;20世纪70年代,太平洋)、法国(1971及1980年后,太平洋)、德国(1982年后,太平洋)、印度(80年代,印度洋),此外还有英国与加拿大等。这些先后所进行的调查对于了解多金属结核在大洋底分布的状况和多金属结核矿区的选择以及开展相关项目的研究都有着积极的意义。1982年《联合国海洋法公约》颁布后,一些海洋大国对国际海底矿产资源权的竞争十分激烈。中国政府十分重视维护本国海洋权益,对大洋矿产资源的调查予以极大关注。我国从1985年起,开始了大洋多金属结核资源调查,并同时开展综合学科的考察工作,先后派出了“向阳红16”号、“向阳红9”号、“海洋4”号及“大洋一号”号科学考察船。国家海洋局率先在中太平洋,而后与地质矿产部(现国土资源部)先后挺进东太平洋。随后在中国大洋矿产资源研究开发协会的统一协调下,又进行了十余个航次的大洋多金属结核资源调查与勘探,取得了重大成果。1991年我国成为继印度、前苏联、日本和法国之后的第五个深海采矿先驱投资者,在太平洋国际海底获得了15万 km^2 合法的开辟区。基本上探明了区内多金属结核的丰度、品位、储量及其分布特点。

从多金属结核的发现至20世纪50年代这一时期,是处在多金属结核的普查性质及学术上的研究阶段。随着调查的逐步深入,人们对结核在海底的分布状况有进一步的了解,进而开始了多金属结核富矿区圈定、资源量评估及矿石选冶工作,同时也相应开展了多金属结核成因、生长速率及其物质来源等方面的研究。

关于多金属结核的形成机制,在不同时期均有论述,这方面资料以国外学者报道的较多。归结起来主要有两种观点,即自生化学沉积和生物成因(后者与本书中研究的超微生物成因存在着本质上的不同)。

我国学者王成厚(1982)在《大洋锰结核》一书中比较详细地介绍了国外学者对锰结核成因的看法,这里不妨简要地引用其中的某些论述,借以了解在过去的几十年中人们对大洋锰结核(原书作者用“锰结核”一词,下同)成因所持的基本观点和研究简史。

戈德堡(1961、1963)、布朗(1972)的研究认为,在海底成核物周围pH值的增高,首先沉淀的 FeOOH 吸附了 Mn^{2+} ,并作为催化剂使 Mn^{2+} 氧化成 Mn^{4+} ,这样不断地吸附和氧化形成了 MnO_2 。克雷勒和巴尔勒斯(Crerar和Barnes,1974)认为海底硅酸盐、碳酸盐、磷酸盐及生物碎屑等成核物表面的 E_h 值比海水中高得多,可极大地增高了Mn的氧化速度,高价锰离子的催化作用又有效地提高了局部环境中的 E_h ,使海水中的氧能高度氧化固体物表面的 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} ,先后形成Fe与Mn互层。Fewkes(1973)认为,细微的胶态铁、锰颗粒的

不断聚集,能结合成葡萄状质块,随着时间的延续一些无定形的胶状物将逐渐转化成晶粒。

Graham 和 Cooper(1959)在对锰结核研究的过程中,于底栖有孔虫和圆棍虫类(*Rhabdommina* sp.)的空介壳内发现有成岩起源的 MnO_2 涂料,推测锰结核是微生物以有孔虫介壳为群居从海水中抽取 MnO_2 的结果。温德特(Wendt, 1974)对从世界各地采集的不同形状锰结核表面构造及光片的观察中均发现有底栖微生物的存在。格林斯内特等(Greenslate, 1974)也发现结核表面有很多由底栖微生物建起的空管或穹窿。他以此进一步推测微结核是依靠于生活在锰结核表面上的底栖微生物的聚集而形成的。可以看出,上述学者主要是从结核中存在的微生物机体及虫壳来阐述锰结核的生物成因的。1973 年比利时古生物学家 Monty 用光学显微镜对取自南大西洋的锰结核的观察发现,锰结核具有叠层石所特有的波状规则纹层,并在以后研究过程中发现丝状菌等微生物。这表明 Monty 等少数学者开始将锰结核看作是由细菌形成的。但由于当时缺乏足够的证据而未被引起广泛的注意。

20 世纪 80 年代中期,国内开始涉及锰结核(多金属结核)开发研究领域,并从不同角度对多金属结核成因进行了许多有益的探讨。例如许东禹等(1993)在《多金属结核的特征及成因》一书中指出,氧化作用、胶体化学作用是结核生长的主要机制,而生物化学作用则促进了上述两个作用的过程。认为结核中的 Fe 与 Mn 主要是呈氧化物或氢氧化物胶体状态出现,铁锰矿物结晶差、结核内所具有的纹层状、树枝状等构造可能是通过胶体化学过程生长起来的。

关于细菌对锰结核影响之报道也有不少论述。如爱利希(Ehrlich, 1972, 1975)通过对锰结核中的锰的还原菌及氧化细菌的培养实验,发现锰氧化细菌促进了 $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ 氧化反应,得出了结核形成与细菌有很大关系的结论。尔后,我国学者史君贤等(1989, 1996)、阎葆瑞等(1994)通过大量的实验证实,海底微生物在多金属结核生长过程中起了积极作用,并进一步提出了微生物对其形成有重要的影响的看法。他们在样品分析中发现,结核、沉积物及底层水中存在着大量的异养细菌、锰细菌、铁还原菌、铁锰细菌及硫酸盐还原菌等。通过铁细菌及硫酸盐还原菌对结核成矿组分作用后的沉淀与溶解实验表明,铁细菌可加快 Fe 与 Mn 的沉淀作用,还原细菌有加速 Mn 元素从固相向液相转移、增强 Mn 迁移的能力,对多金属结核的生长起着促媒作用。同时,他们还从其中某些微生物的矿化现象判定,它们也是多金属结核的建造者。

1994~1995 年国家海洋局第二海洋研究所与南京大学现代分析中心及地球科学系开展协作,利用以光学显微镜、透射电子显微镜及扫描电子显微镜等为主要手段,对东太平洋中国开辟区内多金属结核成因进行了较系统的研究。结果发现多金属结核中许多有意义的细节特征,认为大洋多金属结核具有锰质核形石特征,并鉴定出两种超微生物化石(中华微放线菌和太平洋螺孢菌)。研究进一步指出,光滑型结核和瘤状-粗糙型结核同它们内部发育的微小叠层石与奇异叠层石以及两种超微生物(化石)基本上存在着良好的对应关系。是超微生物本身的生物结构与生长方式决定了叠层石柱体的形态,而后者又造成了多金属结核表面的光滑状或瘤状突起,同时以较充分的证据提出,大洋多金属结核是超微生物的建造体。其内部纹层韵律周期的深层控制因素是全球性气候变化,并有可能最终决定于地球运动轨道变化周期。

从对多金属结核的研究历史看,事物本身总是在不断前进的,在科学技术取得突飞猛进发展的今天,相信通过国内外学者坚持不懈的探索,破解大洋多金属结核成因之谜的答案将是肯定的。

第二章 区域沉积环境与多金属结核

第一节 区域沉积环境

一、地质背景

研究区位于美国夏威夷群岛东南,在东太平洋海盆的中西部,分东、西两区。东区:7°22.5′~9°34.5′N,141°22.5′~143°22.5′W;西区:8°22.5′~11°7.5′N,153°22.5′~154°52.5′W。构造位置上处于克拉里恩(Clarion)和克利珀顿(Clipperton)两断裂带之间的CC成矿带内。研究区东临东太平洋海隆,西濒莱恩群岛,为太平洋板块中一个中间板块(见图2-1-1)。

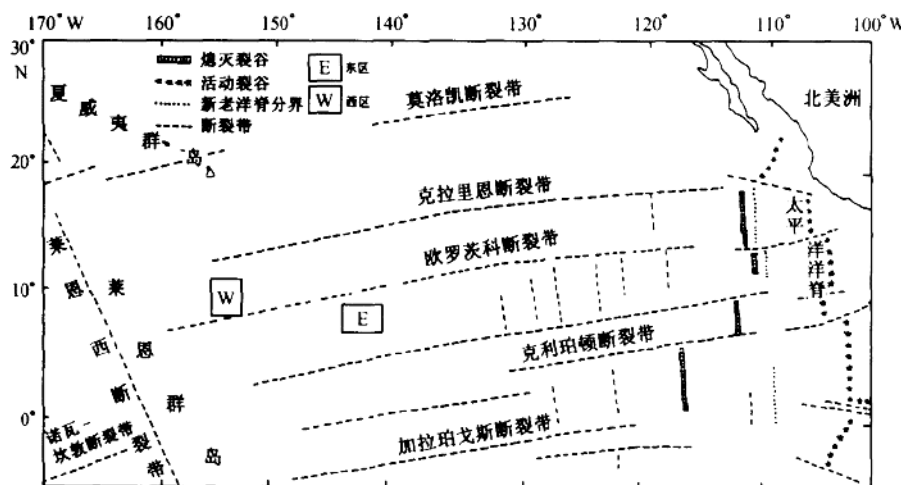


图 2-1-1 研究区位置与区域构造略图

(参照 T. H. van Andel 和 G. R. Heath, 1973, 绘制)

研究区内断裂构造十分发育,主要有两组断裂:一组为 NNW 向断裂,与莱恩群岛延伸方向一致,它可能为中生代至第三纪初的断裂;另一组为 NEE 向断裂,以克利珀顿和克拉里恩断裂为代表的转换断层,切割了 NNW 向断裂,是新生代太平洋板块扩张过程中因受力不均衡产生的转换断层,这些断裂伴随有大量基性岩浆侵入与喷发,主要岩性为拉斑玄武岩、橄榄玄武岩等。研究区东、西两区的地质特征有所差异,东区以强烈的断块作用为主,南北向断裂发育,形成一系列南北向地垒-地堑构造,断裂为高角度张性正断层,最小断距约 100~200m,把基底切割成大小不一的掀斜断块,形成近南北向的脊和谷,在斜坡上常发育有多金属结核。东区内火山喷发活动较弱,仅在局部地区有零星火山喷发,形成孤立的海山和海山群。西区以强烈的基性火山喷发活动为主,它的岩性为拉斑玄武岩、碱性玄武岩等,

形成近东西向的海山和海山链,使地形起伏增大,一般高差达数百米,有的可达1 000m以上。沉积物中火山碎屑较多,这些火山岩块经受海解作用而发生蚀变,岩石中某些金属元素如Fe、Mn、Cu、Co、Ni等被交换出来,进入海水,为多金属结核形成提供了物质来源。同时,火山岩块为多金属结核形成提供了核心物质。这可能也是西区多金属结核核心组分主要是火山岩块的原因。

二、海洋环境

1. 沉积环境

研究区位于太平洋赤道放射虫硅质沉积区内,这里生物沉积作用十分发育,尤其是硅质生物沉积。全区除水深浅于碳酸盐补偿深度(CCD)的海山区沉积钙质沉积物外,其他广大区域几乎全部被硅质沉积物所覆盖,约占全区面积95%以上。Johnson(1974、1976)认为大洋中硅质沉积作用发育程度取决于海水中原始生产力、沉积过程中生物壳溶解作用,以及沉积速度、埋藏和成岩作用条件等因素。

从研究区表层沉积物空间分布来看,大致沿着 $11^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{N}$ 附近有一条近东西向的沉积物分界线,其北部为红褐色深海粘土区,属贫生物含量的岩源沉积区,此区沉积物中生物含量很低,一般低于3%,而粘土矿物、沸石、蒙脱石以及火山岩组分含量一般大于98%;此区多金属结核丰度低、品位亦低,常为个体较小的光滑型结核。其南部为黄褐色硅质沉积物区,沉积物中硅质生物壳含量一般在15%~25%,为富含生物的沉积物区,并向低纬度区生物含量渐渐增多;多金属结核分布普遍,丰度、品位增高,是CC区主要成矿带之一。在硅质沉积区的东部(148°W 以东)沉积物以黄褐色硅质粘土为主,沉积物中硅质生物壳平均为18.5%。沉积物中蒙脱石、沸石和火山岩屑含量一般较低,沸石含量小于1.5%(见表2-1-1);多金属结核以瘤状-粗糙型(s+r型)与粗糙型(r型)结核为主,其核心以老结核碎块为主,结核的品位普遍在2.5%以上,但结核丰度较低,一般为 $3\sim 7\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。硅质沉积区的西部(148°W 以西),表层沉积物以红褐色硅质粘土为主,硅质壳平均含量为17.2%,沸石、火山岩块等与火山喷发作用有关的组分明显增高;结核以个体较小的光滑型(s型)结核为主,它们的核心组分以蚀变的火山岩为主。从这些现象反映出东、西两部的沉积环境、物质来源等有明显的差异。据Betzer等(1984)资料,在 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{N}$ 、 130°W 附近,冬、夏季表层水中的初级生产力(C)分别为 $209\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 与 $147\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$,在 10°N 、 153°W 附近为 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 与 $76\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ (表2-1-2)。

表 2-1-1 硅质沉积区东、西部表层沉积物特征对比

区域	颜色	硅质生物壳/%	沸石含量/%	结核核心组分	结核类型
东部	黄褐色	18.5	1.5	老结核块为主	以s+r型为主
西部	红褐色	17.2	2.0	火山岩块为主	以s型为主

表 2-1-2 东、西区表层水中生物生产力

区域	初级生产力(C)/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$		生物量/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	叶绿素 _a / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	浮游动物个体数/ $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	底栖动物种类数
	冬	夏				
东区	209	147	43	0.1~0.15	2 245	22
西区	100	76	34	0.07~0.08	1 861	16

据 DY85-4 航次水体中生物生产力的测定资料(见表 2-1-2 与表 2-1-3), 叶绿素 a 东区平均值为 $0.1 \sim 0.15 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 西区只有 $0.07 \sim 0.08 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 浮游动物生物量东区为 $43 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 西区为 $34 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从水体垂直分布上也同样显示东区生物生产力比西区要高, 这些生物死亡后, 一部分被溶解, 另一部分沉入洋底。此外, 西区结核表面常沾有火山岩屑等现象, 反映西区内洋底基性火山喷发活动十分频繁与强烈, 并形成尖峰状海山与海山链, 地形起伏较大, 从而造成东、西区沉积物组分、成矿物质和沉积环境的差异。这对多金属结核的成矿作用环境等产生很大的影响。

表 2-1-3 浮游动物种类、生物量和总个体数垂向分布

水深/m	东区			西区		
	种类	生物量 $/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总个体数 $/\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$	种类	生物量 $/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	总个体数 $/\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$
0 ~ 50	58	46.0	29.42	51	27.6	24.62
50 ~ 100	70	55.2	46.46	41	53.2	12.20
100 ~ 200	25	8.8	3.25	30	6.2	2.22
200 ~ 500	29	2.9	0.67	11	1.3	0.13

2. 区域地球化学环境

地球化学环境是成矿环境中极其重要的因素, 它不仅对沉积物有明显影响, 而且对多金属结核形成、发育有直接的关系。不同的地化环境对沉积物颜色、组分、结核的类型、分布与富集等有很大影响, 甚至起到控制作用。Glasby 等(1972)、Cronan(1977)指出, 氧化还原程度是影响结核化学成分、类型和沉积环境的重要因素。

(1) 氧化还原环境

现场对沉积物 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 、上覆水与孔隙水的 pH、Eh 等化学要素的测定结果示于表 2-1-4。

表 2-1-4 上覆水和孔隙水化学要素变化范围与平均值

区域	项目	样品类型	样品数	变化范围	平均值
东 区	pH	上覆水	11	7.766 ~ 7.939	7.837
		孔隙水	24	7.531 ~ 7.817	7.703
	Eh/mV	上覆水	11	393 ~ 476	422
		孔隙水	26	425 ~ 491	452
	碱度/mm ³ ol·L ⁻¹	上覆水	11	2.41 ~ 2.51	2.45
		孔隙水	24	2.27 ~ 2.49	2.43
	氯度/10 ⁻³	上覆水	11	18.63 ~ 19.02	18.86
		孔隙水	24	18.28 ~ 19.11	18.92
Fe ³⁺ /Fe ²⁺		沉积物	26	7.45 ~ 21.79	13.74

续表

区域	项目	样品类型	样品数	变化范围	平均值
西 区	pH	上覆水	12	7.649~7.890	7.588
		孔隙水	22	7.479~7.790	7.785
	Eh/mV	上覆水	12	378~435	412
		孔隙水	23	452~502	472
	碱度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	上覆水	12	2.33~2.49	2.42
		孔隙水	22	2.30~2.54	2.41
	氯度/ 10^{-3}	上覆水	12	18.83~19.77	19.10
		孔隙水	22	18.93~19.85	19.27
	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	沉积物	21	15.69~24.59	20.46

* 据中国大洋多金属结核开辟区勘探报告(I阶段),1998。

由上表可知,东、西区洋底上覆水、孔隙水呈弱碱性,pH值分别为:7.837、7.703和7.785、7.588,东区稍高于西区。东、西区上覆水Eh平均值分别为422mV和412mV;表层沉积物孔隙水Eh平均值分别为452mV和472mV;沉积物的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值,东区平均为13.74,西区平均为20.46。上述资料表明,东、西区洋底均为较强的氧化环境,而西区氧化程度比东区要高。

(2)上覆水、孔隙水中主要金属元素含量

水体中金属元素浓度对多金属结核成矿作用有直接的影响,据现场与实验室测定结果(见表2-1-5)可知,孔隙水中金属元素浓度均高于上覆水,尤其是Mn、Fe浓度差异更大。如东区孔隙水中的Mn、Fe浓度分别为上覆水的35倍和6.4倍,而西区则为4.2倍与9.2倍。因此,东区Mn浓度的变化幅度比西区大。东区孔隙水中Cu、Ni浓度均大于西区,而Co浓度则低于西区,这种现象与东、西区多金属结核中的金属元素含量特征是一致的。

表 2-1-5 上覆水、孔隙水中主要金属元素浓度 (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

区域	元素	上覆水			孔隙水		
		样品数	浓度范围	平均值	样品数	浓度范围	平均值
东 区	Mn	13	0.1~16.0	5.21	19	5.2~2420.0	186.5
	Fe	13	0.5~88.0	18.1	19	25.5~537.0	115.9
	Cu	13	2.23~8.25	3.7	19	4.35~69.5	9.72
	Co	13	0.04~0.27	0.14	19	0.01~1.52	0.30
	Ni	13	0.72~1.46	1.03	19	1.28~5.35	2.00
	Mn/Fe	13	0.07~4.32	0.78	19	0.07~34.08	2.43
西 区	Mn	12	0.1~12.4	4.92	15	3.8~110.6	20.8
	Fe	12	2.5~48.3	16.93	15	2.0~845.7	156.2
	Cu	12	2.27~6.32	3.62	15	2.84~9.28	5.22
	Co	12	0.10~0.27	0.20	15	0.01~1.95	0.43
	Ni	12	1.11~2.54	1.66	15	0.44~3.44	1.50
	Mn/Fe	12	0.04~0.86	0.38	15	0.03~1.90	0.37

3. 区域洋底生态环境

调查表明,在多金属结核区洋底存在大量的底栖生物。经初步鉴定,大型底栖生物共有

32 种,其中多毛类有 9 种、甲壳类 8 种,以下依次有鱼类、棘皮动物、软体动物等(见表 2-1-6)。由表可知,东区底栖生物种类多于西区,其中多毛类、鱼类和棘皮动物类明显多于西区,而甲壳动物则西区多于东区,这反映了东、西区的生态环境有所差异。

根据 24 个站沉积物样品的半定量分析研究,区内大型底栖生物平均总生物量为 $0.068\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,平均总密度为 $17\text{个}/\text{m}^{-2}$ 。东区平均生物量($0.089\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)高于西区($0.047\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$);东区平均密度仍高于西区,分别为 $21.8\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $12.5\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$,各类生物量除多毛类、甲壳类较高外,其余各类群生物含量均较低(表 2-1-7)。

表 2-1-6 研究区洋底大型底栖生物种类

类 型	东区(13 个站)	西区(11 个站)	总种数
海绵动物(Potifera)	1	1	1
水螅(Hydrozoa)	1	2	2
多毛类(Polychaeta)	9	3	9
软体动物(Mollusca)	1	2	3
甲壳动物(Crustacea)	3	6	8
棘皮动物(Echinodermata)	3	1	4
鱼类(Pisces)	4	2	5
合 计	22	17	32

据金翔龙(1997)。

表 2-1-7 研究区底栖生物生物量组成

生物量 $/\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	总生物量 $/\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	海绵 动物	腔肠 动物	线虫	多毛类	甲壳 动物	棘皮 动物	其他 动物
东区	0.089	0.021	0.002	0.003	0.034	0.016	0.010	0.003
西区	0.047	0.011	0.014	0.002	0.007	0.013	—	—
平均	0.068	0.016	0.008	0.002 5	0.020 5	0.014 5	0.005	0.001 5

上述资料表明,在研究区洋底存在着大量的底栖生物,这反映在水深 5 000m 余的洋底仍具备生物生存的环境,有足够的氧气、营养组分等条件,这为生物的生长、繁衍,也为多金属结核的生长、发育提供了条件。

4. 南极底层流

南极底层流对区域沉积作用、多金属结核的形成与发育有重要的影响。南极底层流是一股低温($0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 左右)、高盐、富氧与富含营养盐的底层流,其流速一般为数厘米至几十厘米每秒,但因地而异(Seibold 等, 1982; Hollister, 1974; 增降止大郎等, 1985)。此股底层流从研究区西部莱恩群岛的 3 个水道由西向东进入本区(见图 2-1-2)。实测的南极底层流流速为 $5\sim 10\text{cm}/\text{s}$ (陈冠球等, 2001)。根据 DY85-4 航次调查资料,此流方向也可能存在由南往北进入,但由于受海山链地形的阻挡,使流向、流速发生变化。资料显示,在西区($8^{\circ}00'\sim 11^{\circ}00'\text{N}$, $150^{\circ}00'\sim 156^{\circ}00'\text{W}$)范围内,表层($0\sim 10\text{cm}$)沉积物测温平均温度为 1.12°C (表 2-1-8),往东至 $140^{\circ}00'\sim 143^{\circ}00'\text{W}$,温度为 1.20°C ,东西相距 1 100km,温度下降约 0.1°C 。

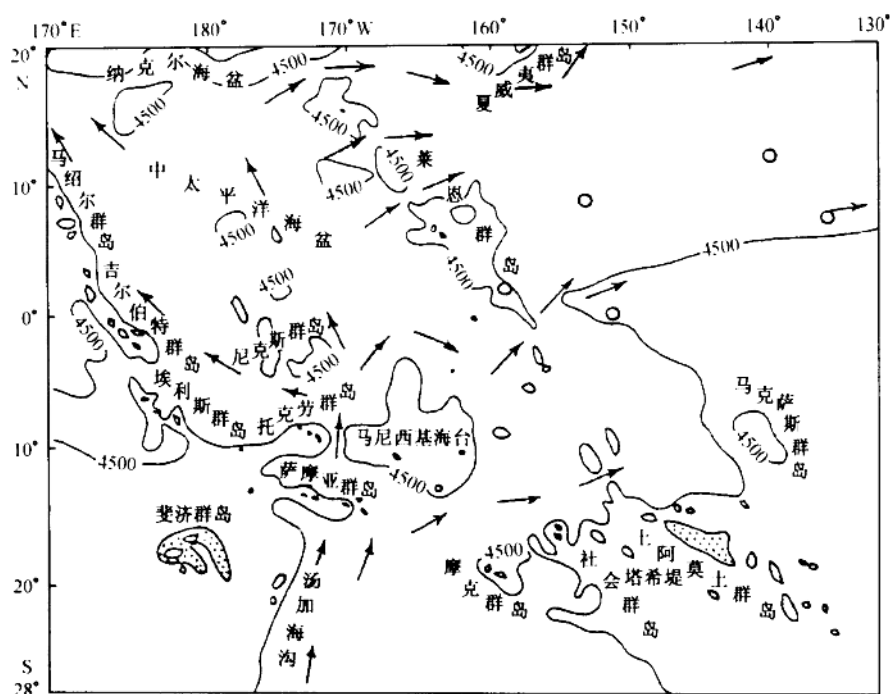


图 2-1-2 太平洋南极底层流流向图(据金翔龙, 1997)

表 2-1-8 不同地区沉积物、上覆水的温度、 E_h 、pH 值

区域/℃	8°~11°N, 151°~156°W		9°~11°30'N, 143°~145°W		9°~13°N, 140°~143°W	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均
温度(沉积物)/℃	0.9~1.20	1.12	1.10~1.30	1.20	1.10~1.40	1.22
E_h (上覆水)/mV	378~435	412			393~476	422
pH(上覆水)	7.649~7.890	7.588			7.766~7.939	7.837

总的来看, 表层沉积物温度比较稳定, 变化幅变很小。 E_h 值(mV)是反映氧化还原条件的重要指标, 调查资料表明, 东区上覆水的 E_h 值的变化范围为 393~476mV, 由西向东有降低现象, 反映研究区是较为氧化环境。pH 值西区为 7.649~7.890, 平均为 7.588; 东区 pH 值为 7.766~7.939, 平均为 7.837, 表明本区为弱碱性的环境。

第二节 多金属结核的特征

多金属结核的特征包括物理性质、结构构造、矿物组分和化学成分等。本节仅作一般性介绍, 以了解结核的基本情况。在后面有关章节中将对结核内部构造、矿物与化学成分特征等方面另作详细阐述。

一、多金属结核物理性质

1. 颜色

在海上取样现场或潮湿状态下, 结核的颜色呈黑色和棕黑色。前者比后者含锰量相对

偏高,铁含量偏低。条痕(粉末状)为褐色。失水后(干燥)的结核多呈灰黑色。

2. 形状

多金属结核具各种各样形状,不同区域结核形态有所差异。东太平洋调查区内结核形态主要有椭球状、球状、花菜状、圆饼状、肾状、不规则状、杨梅状、板状、圆柱状和锥状等。结核集合体形状有哑铃状、葡萄状、连生体状等。图版 I 照片为上述诸形态中的常见者。

3. 粒径

多金属结核的粒径大小相差悬殊,不同海区差别很大。据报道,最大的直径达 100cm,重 62kg,位于北太平洋水深 5 500m 处(王成厚,1982)。经观察得知,大结核与火山岩块作核心有很大关系。以中国开辟区为例,多金属结核大者长轴可达 20cm 以上,小者仅 1~2cm,甚至更小。一般粒径约数厘米。两海区多金属结核的优势粒级有异。据统计,东区与西区结核粒径大于 6cm 的分别为 63% 和 8%,而 3~6cm 的分别占 24% 和 73%,小于 3cm 的结核占一定比例。

4. 硬度和容重

多金属结核硬度值变化范围大,容重大小也不固定。造成这一变化的原因是多方面的:成核物成分及大小、包壳内物质结构的致密程度、铁锰矿物结晶程度以及杂质组分(如粘土物质)含量的多少等,都会使多金属结核的硬度、容重发生变化。同时,结核硬度还会随测试微区(点)位置的不同而异。综合测试结果,结核磨光截面上维氏硬度,大多数低于 $100\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$ (变化区间为 $20\sim150\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$),相当于摩氏硬度 1~4。结核容重为 $1.7\sim2.16\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,但有的资料中容重值偏高,为 $2\sim2.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (王成厚,1982)。

二、多金属结核表面特征

按结核表面的粗糙程度和微粒状集合体形态,所有结核基本上都可分为光滑型结核、粗糙型结核及光滑-粗糙型(又称瘤状-粗糙型或半粗糙型)结核三种。

1. 光滑型结核(s型)

多以卵石状、不规则状(见图版 I-3)、碎屑状及连生体状出现。表面龟裂纹发育,易碎裂。内部泥质含量高。此类型结核多分布在海底高地或海山的钙质或硅质沉积物中。分布水深一般为 4 000~5 000m。

2. 粗糙型结核(r型)

结核表面砂粒感强,易染手。圆球状、椭球状、饼状、杨梅状为其主要形态(见图版 I-1、2、4)。常见在略大于水深 5 000m 的深海盆地、丘间洼地的硅质沉积物中。

3. 光滑-粗糙型结核(s+r型)

其特征是上表面光滑、下表面粗糙,上下部表面接触处有一条呈瘤状突起的“赤道线”,并往往有葡萄状小结核分布。结核形态以椭球状、花菜状为主。其物性特点、矿物及化学成分以及内部构造方面更相似于粗糙型结核。

三、多金属结核内部构造

多金属结核内部构造是研究结核形成机理之重要证据。将多金属结核磨光截面置于反光显微镜下观察,即可见到清晰的纹层构造特征。前人在这方面已有大量的研究报道。纵观他们的分类方案是相当复杂的,有的从成因上分类(许东禹,1993),有的则从宏观构造与