

太平洋中部多金属结核研究文集

(一)

梁德华 主编

地质出版社

太平洋中部多金属结核 研究文集

(一)

梁德华 主编

地质出版社

(京)新登字085号

内 容 简 介

本书是“七五”地质矿产部部控重点科研成果之一,它包括7篇研究论文。书中较全面系统地阐述了太平洋中部多金属结核的矿石矿物、内部构造、结核的丰度、品位、覆盖率与沉积物类型之间的关系以及与结核形成有关的沉积物的沉积速率、古地磁、古环境、水化学特征及金属元素的迁移等。

本书资料丰富,文图并茂。在我国,作者首次应用同位素 ^{10}Be 和微X荧光面扫描分析,分别测定结核生长速率和结核内部元素分布规律;建立了结核“构造层组”的概念,对结核形成机制提出了新见解。

本书可供地质工作者,特别是海洋矿产地质工作者,科研人员和有关院校师生参考。

太平洋中部多金属结核研究文集

(一)

梁德华 主编

*

责任编辑:曾繁彩

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京朝阳区新源印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

*

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:18.75铜版图:21页字数:453000

1992年8月北京第一版·1992年8月北京第一次印刷

印数1—1000册 国内定价:14.65元

ISBN 7-116-01038-6/P·885

序

“神秘”浩瀚的海洋蕴藏着丰富的资源。长期以来，科学家们所进行的调查研究揭示：不但海水中含有多钟有用的金属元素，而且洋底也赋存有极为丰富的矿产资源。多金属结核（简称结核）就是其中的一种。虽然早在一百多年前人们就从大西洋中捞取过锰矿球（即多金属结核），但当时对其元素的含量和性质并不十分了解。随着工业的发展和测试技术的进步，结核的经济价值逐渐被科学家所窥悉。调查表明，所有大洋底都普遍分布有结核，其中以太平洋结核的丰度最高，尤以东太平洋海盆CC区最为富集。

美国、前苏联、日本、法国、德国等先进工业国为了争夺大洋底的结核资源，率先进行调查。70年代初，当发现东太平洋海盆CC区是结核的富集带后，这些国家更是争先恐后，频繁进入该区进行争夺性调查。至70年代末，他们已基本完成了面上的调查，重点海域甚至达到了详查细测的程度。它们的矿区相互重叠，竞争剧烈，在深水区试采结核获得成功。

1982年通过了《联合国海洋法》，这是多年以来发展中国家长期斗争的胜利。海洋法明确规定，国际海底矿产是全人类共享财富。面对争夺海洋的严峻形势，1983年地质矿产部有关文件明确提出，把调查和开发海洋列为地质矿产部一项较长期的任务。1984年国家海洋局、地质矿产部、冶金部、中国有色金属总公司、外交部、国家计委和国家科委等七个部委向国务院呈递了《关于加强大洋锰结核资源调查工作的请示》报告。该报告很快获得批准。

地质矿产部肩负海上调查任务的海洋四号(HY4)于1986—1989年在太平洋中部进行了四个长航次的调查。每次调查均使用了较先进的综合地质、地球物理调查手段。调查方法分三个部分：地质调查包括采用有缆抓斗、箱式及重力活塞取心、拖网、无缆抓斗和无缆重力采样器等多种采样器采取多金属结核、沉积物和岩石等；地球物理调查包括重力、磁力、地震、测深和多频探测等；现场测试包括X荧光光谱分析、简易化学分析、沉积物涂片观察、超微化石鉴定、微生物培养以及现场照相等。此外还进行了单次的和连续的海底照相和温盐深(CTD)测量。

海洋四号船历经580天的海上作业，调查面积达100多万平方公里，测站580个，采样1100次，获结核1800kg，沉积样1700kg，柱状岩心67.7m，海底照片2932张。大量调查资料为文集的编写提供了丰富的素材。文集分两册出版，本书为第一册。

本书包括7篇研究论文，属“七五”地质矿产部部控的86080项目中的研究成果之一。研究的内容较广泛，包括：结核的矿石矿物；沉积速率与结核的生长速率；沉积物类型与结核的丰度、覆盖率和品位的关系；古海洋环境与结核的形成和赋存关系；沉积物古地磁；沉积物有机地球化学与有用金属元素的迁移；海水化学特征与结核的生长关系。

研究区位于太平洋中部，主要包括中太平洋海盆西北部（简称CP区）和东太平洋海盆CC区（图1）。CP区的范围为：7°—12°N，176°E—178°W；CC区为7°—14°N，138°—152°W。CP区西界马绍尔海岭，东濒麦哲伦海岭，北临中太平洋海山，水深4500—

6000m, 地形起伏较大。地形的总体走向为西北向, 与马绍尔海岭大致平行, 地势自西而东逐渐降低。CC区南北分别被克里帕顿和克拉里昂两大断裂带所挟持。地形总体走向近东西向, 与两大断裂带大致平行。但次级地形地貌则明显受南北向的次级断裂控制 (A. T. H. Andol, G. R. Heath et al., 1973), 呈南北向展布。区域地形从东北向西南平缓倾斜。除局部海山或海台外, 大部分地区都属海底丘陵区, 一般水深4700—5100m, 局部达5200—5300m。区内基底岩石, 除局部海山为碱性玄武岩、粗面岩和钠质流纹岩外, 其余均由大洋地壳层拉斑玄武岩组成 (W.B.Bryan, 1966)。基底岩石的年代: 东部——中新世; 中部——始新世; 西部——晚白垩世 (T. H. Van Andel, 1973, L. Meyer, et al., 1983)。表层沉积物, CP区以深海粘土和硅质粘土为主, 而CC区则以硅质粘土和硅质软泥占优势。

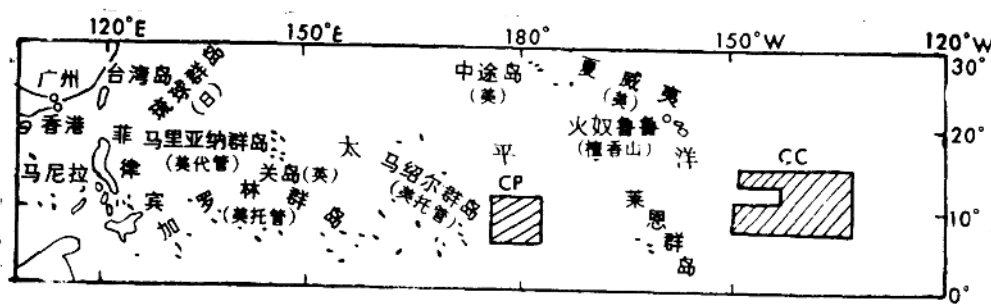


图 1 研究区地理位置图

本书作者尽量采用国内现有的各种先进的分析测试技术, 其中用同位素¹⁰Be测定结核生长速率和用微X荧光面扫描分析结核内部元素的分布, 都属国际上研究结核的最新技术, 且已取得了明显的效果。为了避免片面性, 在分析问题时应尽量采用综合方法, 如确定结核的生长期和生长速率时, 作者使用了结核内部构造、微体古生物、古地磁及同位素测年等综合手段, 相互验证和补充, 提高了结论的可信度。此外, 较广泛地采用了数理统计分析手段, 也是本书的特点之一。

研究结果表明, 调查区内的结核虽然类型繁多, 但CP区以球状、椭球状为主, CC区则以菜花状占优势。结核的产出有暴露型、埋藏型和半埋藏型三种, 其中以半埋藏型者居多。结核内部存在六种构造, 即层纹状、叠层状、致密块状、柱状、斑杂状和同心圆状等。根据结核内部构造特征, 引出结核内部“构造层组”的新概念。依据对“构造层组”间的不整合关系、生物地层学、同位素地质学和古地磁学等的综合研究, 明确提出研究区结核可分出三个主要生长期(早中新世中期, 18Ma以前; 早中新世晚期—中新世早期; 上新世晚期至今)和两个生长间断期。

结核的核心物质较多, 但主要是老结核, 其次为沸石类。结核壳层的锰矿物主要为 δ -MnO₂和钡镁锰矿, 偶含钠水锰矿。铁相矿物主要有赤铁矿、六方纤铁矿。锰矿物有五种组合类型: T、 δ 、T δ 、 δ T和T- δ 等, 它们具有明显的区域变化。控制结核成矿和分布规律的主要因素是物质来源、底层流、沉积物类型、底层水的化学特征、沉积速率、沉积间断、底栖生物活动、成岩早期元素活化作用以及海底地形等。

作者通过宏观分析和数理统计研究,揭示了研究区内沉积物的类型与结核的丰度、覆盖率 and 品位的关系,并指出CP区各个时期结核以沉积成因的为主,其丰度较高,品位较低;CC区I和II生长期的结核,以早期成岩及混合成因者为主,III生长期除海山区为沉积成因的之外,其余地区仍以成岩和混合成因的为主,因而品位较高。

早中新世钙质超微化石软泥的沉积速率最高,为 2.0m/Ma ;上新世至第四纪沸石粘土及硅质粘土的平均沉积速率为 1.9m/Ma ;深海粘土及硅质软泥最低,平均为 1.5m/Ma 。应用生物地层学方法测得结核生长期的平均生长速率为 2.4mm/Ma ; ^{10}Be 法测定结核的第III期平均生长速率为 2.8mm/Ma ;铀系法(^{230}Th)测定第四纪晚期沉积型结核的平均生长速率最小,成岩成因的最大,混合成因的介于两者之间。

特别要指出的是,本书作者提出了一些独特的新见解,认为结核的生长过程和其伴生沉积物的沉积作用具有对应关系,即结核的生长期和沉积物的沉积期对应,结核的生长间断期和沉积物的间断期相对应。结核纵切面物质组成和构造特征是区域沉积环境的缩影,并根据结核“构造层组”的新概念,首次提出了用动—静—渐进脉动式的辩证法则来解释结核的形成过程。

各航次调查的首席科学家王光宇和参加航次调查的科技人员以及海洋四号全体人员,在海上作业克服了重重困难,取得了第一手资料,为本书的完成提供了基础;在文集的评审和编写过程中,承蒙金庆焕、许东禹、李天生等同志的协助和指导,广州海洋地质调查局科技处和第二海洋地质调查大队总工办以及86080项目办公室的大力支持,在此一并深表感谢。

由于作者均首次接触多金属结核,既无经验,水平又有限,书中的错误在所难免,敬请读者不吝批评指正。

梁德华

1991年5月于广州

目 录

太平洋中部多金属结核的矿石矿物·····	梁德华 李扬 谟丽芳 杨胜雄(1)
太平洋中部沉积物沉积速率与多金属结核的生长速率·····	黄永样 周文勤(77)
太平洋中部沉积物类型与多金属结核的丰度、覆盖率和品位的关系·····	
·····	杜炳周 何思力 柯永清(145)
太平洋中部古海洋环境与多金属结核的形成和赋存·····	韩建修 黄永样 陈超云(174)
太平洋中部海底沉积物的古地磁学研究·····	
·····	葛同明 刘坚 樊利民 徐行 文思郁(228)
太平洋中部海底沉积物有机地球化学与有用金属元素的迁移·····	
·····	林旭志 余炎容 姚海惠 吴祖贵(268)
太平洋中部海水水化学特征和多金属结核的生长关系·····	关华显 王韶华(314)

CONTENTS

Introduction

- The Ore Mineral of Polymetallic Nodules from the Central Pacific Ocean.....
 *Liang Dehua, Li Yang, Tan Lifang, Yang Shengxiong*(54)
- Sedimentation Rate of the Sediment and Growth Rate of the Polymetallic Nodules in the Central Pacific Ocean.....
*Huang Yongyang, Zhou Wenqin*(128)
- The Relationships between the Sedimentary Types and the Abundance, Coverage and Grade of Polymetallic Nodules in the Central Pacific Ocean.....
*Du Bingzhou, He Sili, Ke Yongqing*(172)
- The Relationships of the Paleo-Environment with Formation and Concentration of Polymetallic Nodules in the Central Pacific Ocean.....
*Han Jianxiu, Huang Yongyang, Chen Chaoyun*(212)
- Paleomagnetic Study for the Sediments in the Central Pacific Ocean.....*Ge Tongming, Liu Jian, Fan Limin, Xu Xing, Wen Siyu*(267)
- Organic Geochemistry of Submarine Sediments and Migration of the Valuable Metallic Elements in the Central Pacific Ocean.....
*Lin Xuzhi, Yu Yanrong, Yao Haihui, Wu Zuguan*(313)
- Relationship between the Hydrochemical Features of sea water and Growth of Polymetallic Nodules in the Central Pacific Ocean.....*Guan Huaxian Wang Shaohua*(333)

太平洋中部多金属结核的矿石矿物

梁德华 李扬 谈丽芳 杨胜雄

摘 要

太平洋中部多金属结核类型繁多,但CP区以球状、椭球状的为主,CC区则以菜花状者居多。研究区内结核的产出以半埋藏型占优势。结核内具有层纹状、叠层状、致密块状、柱状、斑杂状和同心圆状等6种构造类型。据构造层之间角度不整合关系,菜花状结核可区分出三个大的生长期,二个大的生长间断期。其它类型结核为一个或二个生长期。结核生长期和生长间断期分别与伴生沉积物的沉积期和沉积间断期相对应,而并不象通常认为的那样,只有沉积间断期结核才生长。

结核核心物质虽多,但CC区以老结核为主,CP区则以沸石最多。结核壳层矿物:除偶见钠水锰矿外,锰相矿物主要为 δ - MnO_2 和钡镁锰矿;铁相矿物主要是赤铁矿、六方纤铁矿;脉石矿物有蒙脱石、沸石、伊利石和云母等。结核内锰矿物有五种组合类型:T、 δ 、T δ 、 δ T和T- δ 等,CP区以 δ 占绝对优势,CC区则以T- δ 和T δ 为主,这种区域性变化主要是氧化还原电位和结核地球化学特征引起的。

Q型聚类分析表明,同一结核内的各构造层,其化学成分组合变化不大,不同海区则变化显著。CP区的结核几乎全属水成成因的结核,CC区的则以早期成岩作用和混合成因的占优势。

作者首次提出:用动—静—渐进脉动式的辩证法则来解释结核的形成过程。

前 言

多金属结核(简称结核,下同)是一种潜在的有用资源。结核主要由铁锰物质组成。由于其物质结晶程度低,且交生在一起,结构错综复杂,因此许多学者对结核的铁锰矿物相的命名十分混乱。W.Buser (1956)对结核矿物研究最早,他认为结核主要由10Å水锰矿、7Å水锰矿和 δ - MnO_2 组成。本文将10Å水锰矿称钡镁锰矿、7Å水锰矿称钠水锰矿、水羟锰矿叫 δ - MnO_2 (表1-1)。

表 1-1 结核的矿物名称

作者	1	2	3	4	5	6	7	8
矿物名称	10Å水锰矿 7Å水锰矿 δ - MnO_2	钡镁锰矿 钠水锰矿	布塞尔矿 Na-伯奈斯石 复合钠水锰矿	钡镁锰矿 Na-伯奈斯石 水黑锰矿 S-伯奈斯石	10Å水锰矿 四线形成 δ - MnO_2 两线形成 δ - MnO_2	布塞尔矿	布塞尔矿 偏锰酸矿 (水羟锰矿)	钡镁锰矿 钠水锰矿 δ - MnO_2

1—W.Buser (1956); 2—D.S.Cronan (1969); 3—R.Giovanoli (1969); 4—Von.Heimendahl,
5—A.USui (1976); 6—R.Giovanoli (1980); 7—Ф.В.Успен (1980); 8—本文 (1990)

结核的矿物组成受到金属元素来源和沉积环境的制约,所以研究其矿物组分,对探讨

结核的成因有重要意义。

本文选择了71个（CP区14个，CC区57个）有代表性的结核进行研究（样品位置和采集情况详见图1-1和表1-2）。研究内容包括结核的外部形态类型、产状与分布、内部构造、矿物及其组合特点和化学组分等。此外，对结核的成因和生长模式也进行了初步的探讨。

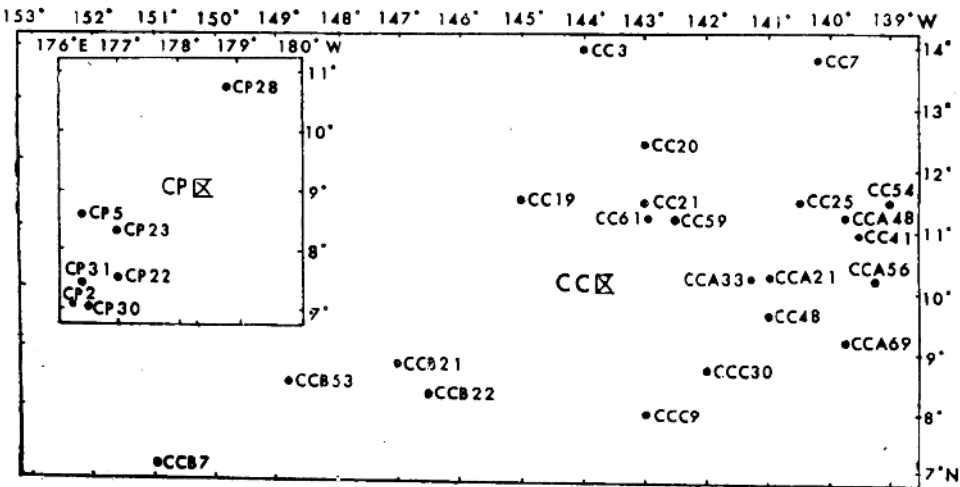


图 1-1 采样位置图

表 1-2 研究和分析样品一览表

产 区	样品号	水深 (m)	结核形态特征	底 质	地形特征	产 状
中 太 平 洋 海 盆 (CP)	CP-22	5050	球状 M (S) _r ⁺		海底丘陵	埋藏型
	CP25-3	6090	球状 S (S) _r ⁺	含沸石硅质粘土	深海平原	埋藏型
	CP25-6	6090	球状 S (S) _r ⁺	含沸石硅质粘土	深海平原	埋藏型
	CP9	5549	椭球状 M (E) _r ⁸	含沸石硅质粘土	海底丘陵	暴露型
	CP9	5549	碎屑状 (F) _r ⁺	含沸石硅质粘土	海底丘陵	暴露型
	CP8	5340	屑碎状 M (F) _r ⁺			半埋藏型
	CP16	6177	碎屑状 M (F) _r ⁺	硅质粘土	平原中丘陵起伏	埋藏型
	CP2	5500	球状连生 M (SP) _r ⁺		海丘坡上	暴露型
	CP28	5766	椭球连生体 L (E-P) _r ⁺		海底丘陵	半埋藏型
	CP4 ⁺	5450	连生体 L (P) _r ⁺		海底丘陵和海盆接触处	半埋藏型
	CP6	5375	连生体 M (P) _r ⁺		丘陵凹地	埋藏型
	CP23	5960	连生体 S (P) _r ⁺	硅质粘土	深海平原	埋藏型
	CP25-7	6090	连生体 (P) _r ⁺	含沸石硅质粘土	深海平原	埋藏型
	CP25-8	6090	连生体 (P) _r ⁺	含沸石硅质粘土	深海平原	埋藏型

L—大型； M—中型； S—小型。 () 内的符号： S—球状； E—椭球状； D—盘状； C—菜花状； P—连生体； T—板状； F—碎屑状。 ()_r⁺ 代号： s—指结核表面光滑； r—指底面粗糙

续表 1-2

产 区	样品号	水深 (m)	结核形态特征	底 质	地形特征	产 状
东	CC30	5030	球状 M (S) :		海底丘陵	暴露型
	CC39	5108	球状 L (S) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CCA133-1	5006	椭球状 S (E) :	硅质粘土	海山坡脚	暴露型
	CCA133-2	5008	椭球状 S (E) :	硅质粘土	海山坡脚	暴露型
	CCA133	5006	椭球状 S (E) :	硅质粘土	海山坡脚	暴露型
	CCA125-1	5193	椭球状 S (E) :	硅质粘土	海山坡底	半埋藏型
太	CCA72-3	5077	椭球状 S (E) :	硅质粘土	海底丘陵	埋藏型
	CC3	5186	椭球状 M (E) :	深海粘土	海底丘陵	埋藏型
	CCB56-1	5189	椭球状 M (E) :		海底丘陵	埋藏型
平	CCB56-3	5189	椭球状 M (E) :		海底丘陵	埋藏型
	CCA16-2	4944	盘状 S (D) :	硅质软泥	平坦海底	半埋藏型
	CCA16-3	4944	盘状 S (D) :	硅质软泥	平坦海底	半埋藏型
洋	CCA42-1	5304	盘状 S (D) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CCA42-2	5304	盘状 S (D) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CCA45-2	4873	盘状 L (D) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
海	CCA72-2	5077	盘状 M (D) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CCA49-1	4910	盘状 M (D) :	硅质软泥	海山沟底	埋藏型
	CC20	5244	盘状 S (D) :	硅质软泥	海底丘陵	埋藏型
盆	CC19	5319	盘状 L (C) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CCA45	4873	菜花状 L (C) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CCA48	4840	菜花状 L (C) :	钙硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
(CC)	CCA91	5073	菜花状 L (C) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CC17	5282	菜花状 L (C) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CC45	5400	菜花状 L (C) :	玄武岩	海丘斜坡	半埋藏型
盆	CCC56	5120	菜花状 L (C) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CCB21	5260	菜花状 L (C) :	硅质粘土	丘陵内平坦地	半埋藏型
	CCA5-1	5175	菜花状 L (C) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
(CC)	CCA5-2	5175	菜花状 L (C) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
	CCA16	4944	菜花状 L (C) :	硅质软泥	平坦海底	埋藏型
	CCA27	5003	菜花状 L (C) :	硅质粘土	海底丘陵	半埋藏型
盆	CCA49	4910	菜花状 M (C) :	硅质软泥	海山沟底	半埋藏型
	CC21	5096	菜花状 L (C) :	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CC28	4945	菜花状 L (C) :		海底丘陵	半埋藏型

续表 1-2

产 区	样品号	水深 (m)	结核形态特征	底 质	地形特征	产 状
东	CC51	4889	菜花状 M (C) ;	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CC51-1	4889	菜花状 L (C) ;	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CC51-9	4889	菜花状 L (C) ;	硅质软泥	海底丘陵	半埋藏型
	CC61	6220	菜花状 S (C) ;		海底丘陵	半埋藏型
	CCB15	6254	菜花状 L (C) ;	钙硅质粘土	平坦海底	埋藏型
太	CC32	4915	板状 M (T) ;		海底丘陵	半埋藏型
	CC45	5400	板状 M (T) ;	玄武岩	海丘斜坡	埋藏型
	GCA72-1	5077	碎屑状 S (F) ;	硅质粘土	海底丘陵	埋藏型
平	CC38	4972	碎屑状 S (F) ;	硅质软泥	海底丘陵	埋藏型
	CC7	4848	杨梅状 S (B) ;	硅质超微化石软泥	海底丘陵	埋藏型
	CCC3	5035	杨梅状 S (B) ;	硅质软泥	海底丘陵	埋藏型
洋	CCA16-1	4944	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	平坦海底	暴露型
	CCA20	4941	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	GCA20-1	4941	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	CCA20-2	4941	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	CCA33	4967	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
海	CCA33-2	4967	连生体状 M (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	GCA33-3	4967	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	CC32	4915	连生体状 L (P) ;		海底丘陵	暴露型
盆	CC41	4990	连生体状 M (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
	CCB7-2	6189	连生体状 S (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	暴露型
(CC)	CC26	4950	连生体状 M (P) ;	硅质软泥	海底丘陵	埋藏型
	CC69	5083	连生体状 S (P) ;	硅质粘土	海底丘陵	埋藏型
	CCB56	6189	连生体状 M (P) ;		海底丘陵	埋藏型

由于结核的矿物成分异常复杂,且其结晶程度极低,颗粒很小,故采用多种测试手段(表1-3)对其进行了综合研究,其中应用微X射线荧光扫描研究结核的特征,在国内尚属首次。此外,还运用了Q型聚类分析,来研究探针测点间元素的关系。

表 1-3 测试手段和工作量统计

测试手段	研究内容	分 析 项 目	数 量 统 计		
			CPE	CC区	合计
肉眼、实体、显微镜	形貌	形态、表征、连生	12 (片)	67 (片)	79 (片)
矿相显微镜、显微镜、硬度仪	物理	反射率、硬度	1 (个)	4 (个)	5 (个)

续表 1-3

测试手段	研究内容	分析项目	数量统计		
			CP区	CC区	合计
偏光显微镜	矿物特征	金属矿物、杂质矿物特征、结构构造	2 (片)	19 (片)	21 (片)
X射线衍射分析	物相鉴定	矿物成分	13个结核47个样	28个结核129个样	41个结核176个样
红外光谱分析	矿物	鉴定矿物相	10个结核23个样	22个结核56个样	32个结核79个样
穆斯堡尔谱分析	含铁矿物结构	确定铁矿物价态及配位数	2个结核4个样	5个结核9个样	7个结核13个样
透射电镜及能谱分析	矿物	矿物及形貌和化学成分	2 (个)	3 (个)	5 (个)
电子探针分析	矿物化学	主要元素及其共生	10个结核128个点	22个结核245个点	32个结核373个点
微X射线荧光扫描分析	主要元素分布	Mn、Fe、Cu、Ni、Mn/Fe	1 (个)	3 (个)	4 (个)

第一节 多金属结核的外部特征和分类

研究区的结核主要呈黑色和黑褐色。大体上CC区结核的颜色比CP区的略深，通常含铁量高者常呈淡红褐色，而富锰者则为金属黑色。刚从海底采上的结核较软，干后稍硬易碎。硬度变化较大，莫氏硬度为1—4，晶质的铁、锰矿物比非晶质者硬度大。结核的大小相差悬殊，可见从颗粒小于1mm的微结核，到直径大于10cm的大结核，但区内以2—6cm者居多。

结核的形状千姿百态，有球形、椭球形、盘状、菜花状、板状、碎屑状、杨梅状、各种连生体等。其中菜花状只出现在CC区。这里只展示少量有代表性的形态照片(图版I, 1—7)。

结核的分类，国际上尚无统一的方案。K. Meyer(1973)、M. A. Maylan(1974)和盛谷(1977)等人主要以形态、大小和表面结构特征作基础进行分类。P. Halbach和Ozkarra(1979)除根据形态外，还考虑了地球化学和成因因素。为了便于对比，本文采用了HY 4-871航次报告(1989)中结核的分类方案(1-4)。它是以Maylan的分类为基础，并根据实际情况作了些修改。从表1-4中看出，区内可分出21种结核类型，其中菜花状和杨梅状是新增加的类型，前者仅见于CC区，而后者两区均有。本文重点研究菜花状、球状(或椭球状)、杨梅状、盘状和连生体状结核。

结核表面常见附着放射虫(图版I, 1)、沸石小球和骨针聚集体(图版I, 2)、现代生物(图版I, 3)和虫穴、骨刺及其它硅质生物等(图版I, 4、5)。为了了解结核表面微形貌特征，选择了CP4、CP5、CC20、CC38、CC17、CCB15等6个结核进行电镜扫描，从50张显微照片中可以看出，结核表面主要有5种微形貌：

乳状：主要由铁锰质组成。乳状体一般具有乳头，乳体的直径40—60 μm ，最大可达120 μm ，大小混生一起，乳头常朝同一方向生长，与水平面成一交角(图版I, 6)。

葡萄状：由铁、锰质微结核聚集而成。葡萄体直径5—8 μm 。有的葡萄体呈串状，有的较分散，串状葡萄体的方向不定(图版I, 7)。

肾状：铁锰物质呈肾状群生。与葡萄状的区别是，肾的单体呈椭球状，且其长径可达8—10 μm ，逐个叠生或呈椭球连生体(图版I, 8)。

豆荚状：呈集合体生长，豆体直径4—10 μm ，无定向，表面较光滑(图版I, 9)。

表 1-4 结 核 分 类 表

类 型	大 小	形 态	表 面 结 构
L (S)	大 型 ≥6cm	球 状	粗糙/光滑
L (E)		椭球状	粗糙/光滑
L (D)		盘 状	粗 糙
L (C)		菜花状	粗 糙
L (P)		连生体	粗糙/光滑
L (T)		板 状	光滑/粗糙
L (F)		碎屑状	光滑/粗糙
M (S)	中 型 3—6cm	球 状	粗糙/光滑
M (E)		椭球状	粗糙/光滑
M (D)		盘 状	粗 糙
M (C)		菜花状	粗 糙
M (P)		连生体	粗糙/光滑
M (T)		板 状	光滑/粗糙
M (F)		碎屑状	光滑/粗糙
S (S)	小 型 <3cm	球 状	粗糙/光滑
S (E)		椭球状	粗糙/光滑
S (D)		盘 状	粗 糙
S (B)		杨梅状	粗 糙
S (T)		板 状	光滑/粗糙
S (P)		连生体	粗糙/光滑
S (F)		碎屑状	光滑/粗糙

类型符号说明见表1-2。

附着生物结构：主要由放射虫骨骼和生物骨针附生于结核表面。生物骨骼大小不一，最大可达200 μ m（图版I，1、3、4、5）。

同一结核表面可同时出现二或三种微形貌，如CP25既有乳状也有肾状，CC17有葡萄状、肾状和附着生物。暴露型结核以葡萄状为主，深埋结核主要呈乳状和肾状，而半埋藏型结核则呈现多种形貌特征。

第二节 多金属结核的产状和分布

结核多数产于沉积物表层，其赋存状态有暴露、埋藏和半埋藏三种方式。通常是暴露型结核表面显得较光滑，埋藏型的结核表面较粗糙，而半埋藏型的结核顶面光滑、底面粗糙。总体上，无论是CP区或CC区都以半埋藏型结核分布较广，且以中型者占优势。埋藏型结核，一般以小型为主，埋深不超过20—30cm，个别达63cm。暴露型结核相对少些，

以大、中型者为主。

结核的丰度往往受地形地貌单元所控制。宏观上海山或海底丘陵区其丰度高于平坦的海底平原区。结核的分布相当不均匀,其类型与地形也有一定关系,如CP区,只在海山区生成的结核直径较大(3—6cm),形态类型较单一,以球状、椭球状和连生体占多数,并以半埋藏型和暴露型为主;深水盆地产出的结核,以小型者为主,中型次之,形态千姿百态,以埋藏型占优势。

在CC区西北部断裂槽谷区和东北海底高原区都是以小型埋藏结核为主;东部海底平原区,以板状、杨梅状和连生体为主;在地形较复杂的海山区,结核的形态类型较多,有椭球连生体、板状、菜花状、椭球状和盘状等。海山坡和山脚下常出现大量碎屑状结核;南部和西南部广大的海底丘陵区,以菜花状结核占绝对优势,其它类型的结核仅局部可见到。

不同沉积区,结核的丰度有异。CP区结核的高丰度($>20\text{kg/m}^2$)区主要出现在含钙硅质粘土、含钙硅质软泥和沸石粘土等表层沉积物分布区,其次为硅质粘土分布区。CC区通常在硅质粘土区结核丰度最高(5— 10kg/m^2 和 $>10\text{kg/m}^2$),其次为硅质软泥区。

不同沉积物类型区,结核类型有差别。深海粘土区产出的结核以杨梅状为主;CC区硅质软泥区以板状和杨梅状结核为主;钙质超微化石软泥区,以碎屑状连生体最常见;硅质粘土区则以菜花状结核占优势。

显然,研究区内结核的产出类型、分布和丰度均受到地形地貌单元和沉积物类型的控制。

第三节 多金属结核的内部构造

研究结核的内部构造特征,对探讨结核的形成过程有重要意义。有关这方面的专著并不多见。R. K. Sorensen和A. R. Foster (1977)曾将结核内部划分为块状、斑杂状、柱状和层纹状等五种构造,并认为斑杂状和柱状构造最常见。V. Marching和P. Halbach (1982)把东北太平洋结核的内部构造从内至外分成四个生长带:老层纹带、老树枝带、年轻层纹带、年轻树枝带。

一、构造类型及特征

本文选择了42个结核样品的光片进行研究,其中菜花状结核10个(埋藏型7个,半埋藏型3个);连生体结核10个(埋藏型4个、半埋藏型1个、暴露型5个);其它形态类型的单体结核19个(埋藏型6个、半埋藏型11个、暴露型2个)(表1-2)。通过在显微镜下对每个结核的详细观察,连续系统的显微照像表明,结核的内部构造较复杂,其构造的最小单元是极细的微细纹理(约 $1\mu\text{m}$),由纹理组成微层(主要由铁、锰物质和粘土等组成)。根据微层形态和组合特征可将研究区的结核内部划分为层纹状、叠层状、致密块状、柱状、斑杂状和同心圆6种构造类型。从宏观上看,前三种呈致密状,后三者则呈疏松状。

层纹状构造:普遍见于各种类型的结核中。由反射率低的铁锰质粘土和反射率较高的灰色锰—铁氧化物或白色铁—锰氧化物共同组成纹理。颜色的深浅和反射率的高低取决于其结晶程度。结晶良好者,颜色偏浅、反射率偏高。结晶好的矿物构成的纹理带,在正交偏光镜下呈波状消光。纹理的形态通常较平缓,延伸长且稳定。有的结核内可出现2—3个

带, 如CP2-8结核, 从里往外依次出现: 平缓层纹→波伏起伏层纹→较强烈起伏层纹。通常靠近核心部位或层纹带内侧, 层纹理较清晰、稳定, 延续性好(图版Ⅲ, 1-3)。

叠层状构造: 普遍发育。由非晶质铁-锰氧化物或晶质铁-锰氧化物和粘土矿物组成的微层交替相叠、高角度弯曲。形态酷似叠层石。在反射光下, 锰铁氧化物反射率较高, 呈白色致密状; 粘土质反射率低, 为暗黑色, 呈凹痕状。其壳层界线较层纹构造的模糊, 时隐时现。壳层构造相当于V. Marching等(1987)所称的树枝带(dendritic zone)。它常与层纹构造交替出现、交生一起或向其过渡, 也有与其它构造混生, 叠层构造中铁锰质结晶程度较好, 反射率中一高(图版Ⅲ, 4、5)。

致密块状构造: 块体主要由交生的晶质矿物组成。其内部结构较单一, 呈致密状, 其中有时包含有较小的同心圆构造、稀疏的微纹理, 并常和叠层构造共生(图版Ⅲ, 6)。

柱状构造: 由非晶质或晶质物质的层纹柱状体组成, 为叠层构造的变种。不同点是它的微层弯曲处的峰更高, 角度更陡。柱状体呈平行或放射状排列。柱体长2—5mm, 宽0.25—0.7mm, 由一个个同心层状尖锥组成。构成柱体的物质与叠层状构造基本相同。柱体间有沸石、粘土分布。柱体淡白或灰色的纹理是由钡镁锰矿和钠水锰矿组成的, 暗色部分是富铁和非晶质物质。Foster(1970)把这种构造称柱状带(图版Ⅲ, 7、8)。

斑杂状构造: 一种是由致密混杂且不连续的层纹围绕斑状物质组成的。斑状物质有沸石、长石、生物骨骼、硅质及粘土质矿物。基质中暗色者常为粘土质, 亮灰或灰色者为铁锰氧化物、氢氧化物(构成波状起伏环带状微层)。另一种是由两种或两种以上的构造不规则地混杂一起形成的。斑杂构造中锰氧化物含量稍高, 结晶程度较好, 反射率偏高(图版Ⅲ, 9、10)。

同心圆构造: 由反射率低、颜色发暗的粘土微层和反射率较高、颜色为灰或灰白色铁锰(或铁)氧化物微层交替出现, 并围绕同一核心分布, 核心物质往往是粘土或其它矿物质点。当几个同心圆群生在一起时, 它们便具有共同的白色(铁锰氧化物)外圈层。在单体同心圆或群生同心圆之间, 通常为暗黑色粘土分布(图版Ⅲ, 11、12)。

二、构造层组划分

结核内部的构造特征可反映结核的生成环境及其演变过程。层纹构造显示稳定环境; 斑杂状构造和同心圆构造反映环境稍有动荡; 而叠层状、柱状和致密块状等构造则介于两者之间。

通过对几十个结核内部构造的系统观察, 根据各种构造类型的特点及其相互关系, 这里我们引出结核内部“构造层组”这一概念。它是指在大体相同的环境下, 同期形成的一个或若干个构造类型的组合层, 其顶、底面被间断面所限。结核从其核心到最外壳层, 其内部构造反映了形成时伴生沉积物的沉积历史。换言之, 结核的组成物质和内部构造是区域沉积环境变化的缩影, 研究通过核心的完整结核断面, 就近似于陆上测量一条地质剖面或分析海上一个柱状岩心。那么, 结核构造层组的划分必须考虑以下几个因素: ①构造层组的划分标志主要是壳层间出现大而明显的角度不整合(如图1-2)。②不同构造层组中含有不同时代的化石组合(图版Ⅳ7-12)。③同一构造层组内, 可由单一类型的构造或数种类型的构造组成, 构造类型之间呈过渡、整合接触关系。依据上述原则, CC区菜花状结核的内部构造多数可分出三个主要的构造层组(I、II、III)(图1-3)。10个连生体结核中

