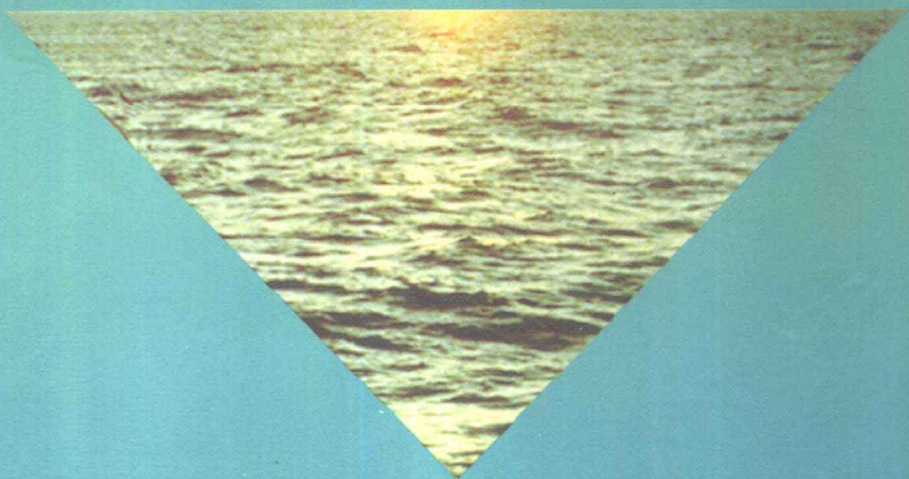


李扬 刘淑琴 梁德华等著

多金属结核类型 结构构造及其矿物组成



《东太平洋海盆多金属结核分布规律研究》丛书之二 中国地质大学出版社



《东太平洋海盆多金属结核分布规律研究》丛书之二

多金属结核类型、结构构造 及其矿物组成

李扬 刘淑琴 梁德华 潘家华 著

中国地质大学出版社

内容简介

本书对多金属结核类型及其分布、结核构造及矿物组成、不同构造层组中锰矿物分布及化学成分进行了全面的研究,详细划分了结核构造的成因类型;深入探讨了结核壳层构造形成环境;首次采用多相条件,对锰相矿物转变进行模拟实验,证实了钙锰矿与水羟锰矿之间不存在相转变;讨论了钙锰矿定名问题。

本书的研究重点在于不同成矿阶段的矿物组成、形成环境及锰相矿物转变实验研究。

本书可供从事矿物学、海洋地质矿产研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多金属结核类型、结构构造及其矿物组成/李扬等著. —武汉:中国地质大学出版社,
1996.12

(《东太平洋海盆多金属结核分布规律研究》丛书之二)

ISBN 7-5625-1149-7

I. 多…

II. 李…

III. ①多金属结核-类型-研究②多金属矿床-结核(沉积学)-沉积构造-研究③多金属结核-矿物组合-研究

IV. P744

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 张华瑛 责任校对 杨霖 版面设计 阮一飞

印 刷 中国地质大学印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 6 字数 160 千字 图版 21

1997年1月第1版 1997年1月第1次印刷 印数 1—300册

定价: 29.10元

前 言

“七五”期间在我国开展对中太平洋多金属结核矿产调查的同时,为了拓开我国大洋地质科学的发展,地质矿产部相应确立“太平洋中部多金属结核调查和研究”为“七五”期间地质矿产部^①的重点科研项目。该项目几乎囊括了多金属结核的分布及其成矿和富集的有关理论性问题。研究成果已汇集成《太平洋中部多金属结核及其形成环境》专著、《太平洋中部多金属结核综合研究》10册系列书和2本研究文集及多篇论文。所有这些成果均已发表问世,这对推动我国大洋矿产科学研究起到了先驱的作用。

大洋多金属结核的调查与研究,对我们来说尚属新领域,虽然已取得了可喜的成绩,但是,结核是赋存于海底表层沉积物之上的,是特定的地质环境中特殊的地质作用的产物,由于其形成的环境很复杂,可以说迄今对其形成环境、成矿机理尚未搞得很清楚,有些问题还在争论。本书是在“七五”研究的基础上,参考国内外有关文献,针对存在的问题,以我国调查翔实的资料为依据,力图通过各类结核内部构造、物质组成,探索其形成环境。

本书属《东太平洋海盆CC区多金属结核分布规律研究》课题下属的研究专题之一,编号为DY8502-01-3。研究的主要问题包括:结核类型及其分布特征、结核壳层的构造、构造层组的化学成分、结核矿物组成和矿物相转变的实验等。关于这些问题的研究现状,第一章第二节已有阐述,这里需要强调指出的是:结核内部构造特征及其物质含量的配比,最能直接反映其自身的形成、演变、成矿的环境,换言之,采用有效的技术,通过微观研究结核的构造和成分特征,就可以揭露其演变历史、成矿及富集规律。基于这种认识,加之吸取了前人研究经验和存在的问题,我们始终把结核内部的构造层组作为重点解剖对象,即是说通过研究结核内各个构造层组纹层构造及其组合特征、矿物组成、化学成分的变化等,从而区分出各类结核的生长期(或称生长阶段),导出研究区结核的形成地质环境及其演化历史。

由于结核物质组分复杂,矿物结晶程度很差,加之测试费用昂贵,给研究带来极大的困难,故对其矿物成分的研究,仅着重于锰相矿物,对其他矿物,如铁相矿物和杂质矿物只作简单介绍。

研究过程中我们对矿物相转变实验,付出了很长时间和很多精力。通过模拟条件的多次实验表明,结核中锰相矿物(指钙锰矿、水钠锰矿和水羟锰矿)之间,不存在相互交代或相转变关系,它们都原生共存于结核中。经过实验和有关测试技术的配合,新发现结核中除钙锰矿、水钠锰矿或水羟锰矿外,尚有布赛尔矿(I型和II型)、钴土矿和未定名的 MnO_2 矿。过去所指的钡镁锰矿(钙锰矿)称为 $10\text{\AA}$ ^②锰矿物更符合实际情况。

本书收集的资料丰富且样品较广泛,除“八五”期间DY85-1和DY85-3航次的样品、资料外,还有一部分为“七五”期间调查的有关样品。对分布于研究区(图1)的64个多金属结核样品(图2、图3)进行了分层取样,对取得的296个样品采用了包括偏光显微镜观察、透射电子显微镜分析、X射线衍射分析、穆斯堡尔谱分析、红外光谱分析、电子探针分析、原子吸收和常规化学分析等先进的分析技术进行了分析测试。此外还应用了计算机技术对矿物

^① “地质矿产部”以下简称为“地矿部”;

^② $\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ 。

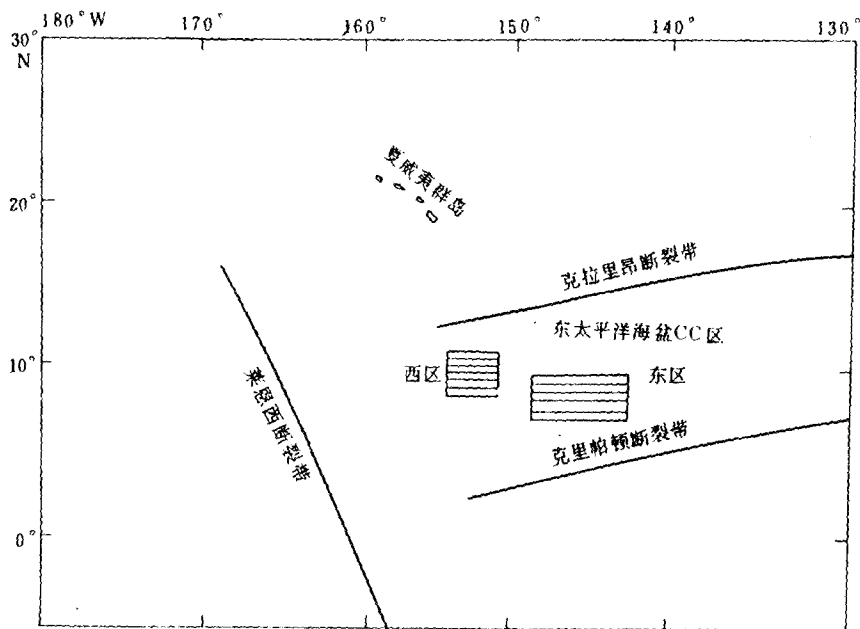


图1 研究区位置图

组分和内部构造层组的化学成分进行处理并绘制成图。

本书从结核内部微观信息推导出结核宏观分布及其成矿环境，这对圈定富矿区及结核经济评价具有重要意义。

本研究专题是由广州海洋地质调查局和地质科学院矿床所共同承担的，参加专题的人员除本书作者外，尚有吴必豪、杨锐、方小波。样品测试分析由广州海洋地质调查局实验测试中心，地质科学院矿床所X射线衍射室、电子探针室、电子显微镜室、红外光谱室完成。

编写分工：前言和第一、五章及结论与讨论，梁德华；第二、三章，李扬；第四章，刘淑琴、潘家华；李扬、梁德华负责统稿。

何高文、曾瑞坚协助用微机对化学成分资料进行处理和成图，梁广和张生完成报告文字、表格的打字，在此致以谢意。

承蒙赵鹏大院士、傅家谟院士，陈毓蔚、金庆焕、余梦迪、许时耕、周人初、姚德等专家对本书进行了评审，提出了宝贵的意见和建议，在此向他们及为本书的完成而给予支持和帮助的有关领导和同志一并表示感谢。本书难免有疏漏不妥之处，敬请读者指正。

作者

1996年6月于广州

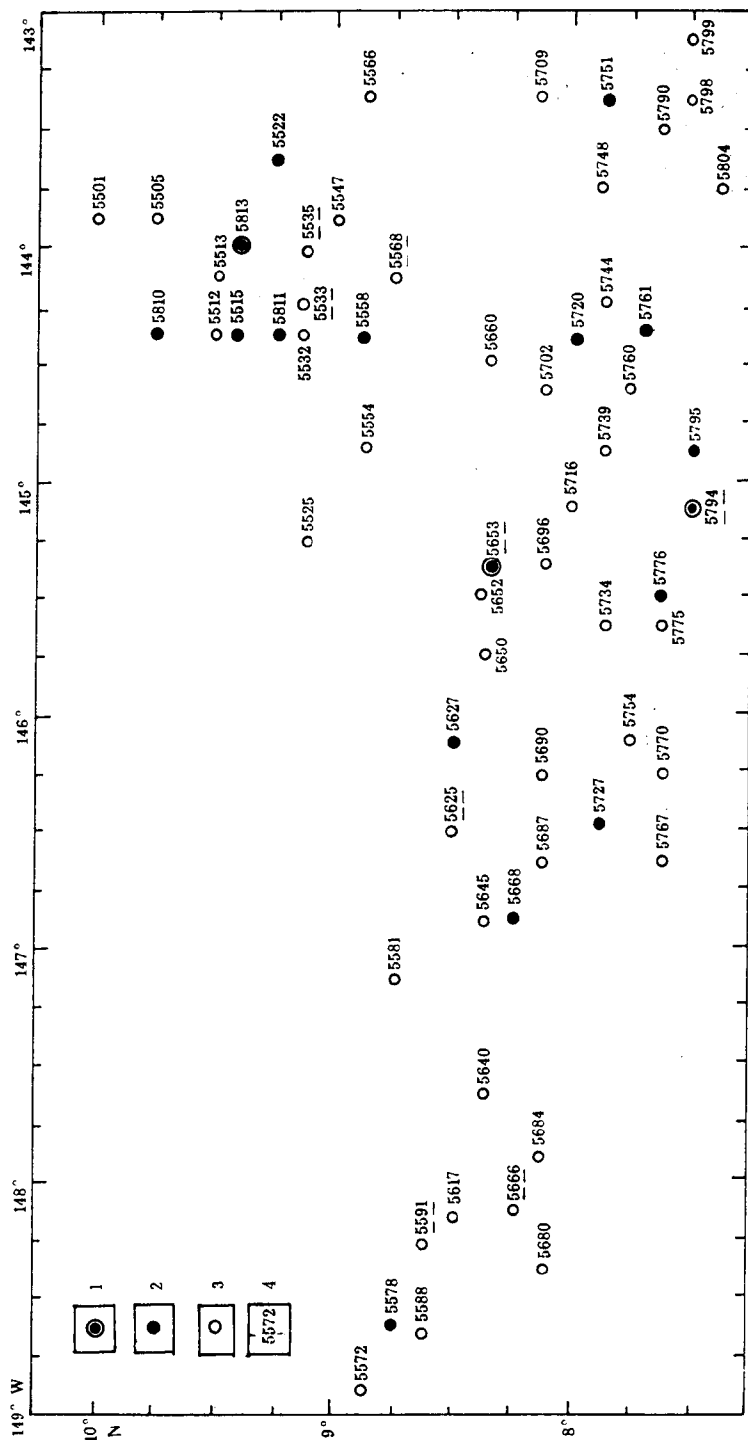


图 2 研究区东区样品分布位置图

1. 大型重力活塞采样; 2. 无绳重力采样; 3. 表层采样 (有绳抓斗或箱式采样); 4. 站号 (下加虚线表示该站做结核样品分析)

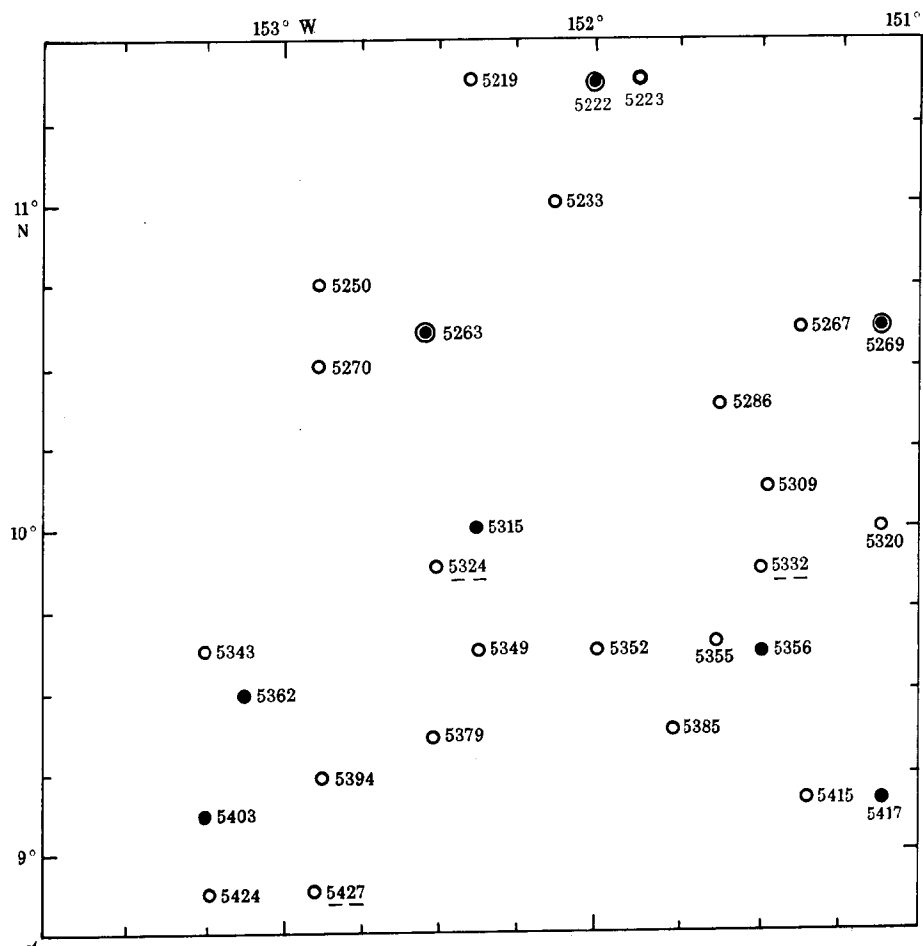


图 3 西区研究样品分布图
图例同图 2

目 录

前言	(I)
第一章 概况	(1)
第一节 地质背景	(1)
第二节 研究现状	(3)
第三节 研究内容和方法	(5)
第二章 多金属结核的类型及分布特征	(7)
第一节 多金属结核的类型	(7)
第二节 多金属结核的分布特征	(10)
第三章 多金属结核的构造特征	(19)
第一节 多金属结核的构造	(19)
第二节 多金属结核壳层构造形成环境讨论	(23)
第四章 多金属结核的矿物组成	(27)
第一节 锰矿物	(27)
第二节 铁矿物	(56)
第三节 脉石矿物	(57)
第五章 多金属结核构造层组化学成分	(60)
第一节 样品的选择及测试成果的处理	(60)
第二节 结核构造层组化学成分特点	(61)
结论与讨论	(78)
参考文献	(81)
图版说明及图版	(83)

第一章 概 况

本章简述研究区地质背景、结核分类及内部构造、组分的研究现状及研究内容与方法等。

第一节 地质背景

一、区域构造特征

研究区位于东太平洋海盆 CC 区西南部。地理坐标大致为 $3^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{N}$ 、 $138^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{W}$ 。区域上属于太平洋板块内新生代一块体。这一块体呈长斜方形，其南北面分别为克里帕顿和克拉里昂两大转换断裂带所截。它们是太平洋板块活动的产物，走向近 EW 向，两者在地貌上均有显示，克拉里昂断裂带表现多槽谷山脊带，长约 2 100km，宽 40~80km，从局部地段分析，其北盘为重力负异常，南盘为正异常，显示南盘地壳变异，磁场上往往明显错断条带轴线，火山活动较强。克里帕顿断裂带地形地貌上的显示逊色于克拉里昂断裂带，仅在其两端具条带状山脊特征，该断裂带长度大于 200km，宽 40~50km，活动强度上似弱于克拉里昂断裂带。

总体上区内一级构造线的走向与上述两大断裂带平行。次级构造为近 SN 向。从 Seabeam 测线地形图上显示，块体内部尚有若干条近 EW 走向的断裂带展布，沿断裂带常有火山活动。大致以 149°W 为界，EW 构造面貌迥然有别，其特征表现于下述地形地貌上。

二、地形特征

研究区大致以 149°W 为界分东、西两个区，东区为 DY85-3 航次调查的海域，西区为 DY85-1 航次调查的范围。

按形态-成因及特征，东区的地形地貌可分为：海山海丘区和深海丘陵区，而西区分为：海山区、海山海丘区、山间盆地区和深海平原区。东西两区各地形地貌单元还可划出次级单元。

研究区的一级地形地貌形态受上述的克拉里昂和克里帕顿两条断裂带的控制。大体上地形从东北向西南微微倾斜，东区水深约 4 800~5 200m，西区 4 800~5 300m。两区地形具有以下几点差异：

(1) 东区深水丘陵区，地形相对较平坦，水深一般为 5 000~5 200m，局部为 5 300m，高差为 50~100m。西区的海山海丘区，地形起伏稍大，水深为 3 950~4 500m，高差约为 400~450m，局部达 1 000m，陡坡为 $9^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ，缓坡为 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。

(2) 东区海山往往以孤立状态出现，常以 5 100m 或 5 200m 等深线圈闭，高差 700~800m，海山的走向主要为 NEE 向，坡度大于 5° 。西区的海山明显呈链状，数条海山链横贯全区，均呈近 EW 向展布。海山常以 5 000~5 100m 水深线圈闭，海山高差较大(420~1 400m)，坡度为 $2^{\circ}\sim 11^{\circ}$ ，有的达 21° 左右。

(3) 线状丘陵区仅见于东区的东部，而山间盆地只出现在西区。

(4) 东区中部 (如 DY85-4 航次调查海域), NNW 向槽沟地形较发育。

三、表层沉积物

研究区内沉积物性质的最大特点是以硅质沉积为主导, 钙质沉积常见于水深小于 5 000m 的海山海丘区, 东西两区沉积物类型大体相同, 但亦有些小差别, 即东区硅质生物含量略低于西区, 粘土的含量东区高于西区。因此, 西区以硅质软泥为主 (约 70%) (图 1-1), 而东区则以硅质粘土占优势 (约 98%) (图 1-2)。东区除硅质粘土外, 还有少量硅质软泥、钙硅质软泥、硅钙质软泥、含硅质软泥、含钙硅质软泥和沸石粘土。表层沉积物的成分包括碎屑矿物、自生矿物、粘土矿物、宇宙尘和生物组分等。碎屑矿物在不同类型沉积物中, 其含量稍有不同, 但含量一般都不超过 1%。碎屑矿物主要来源于火山物质, 包括火山玻璃、石英、长石、辉石、橄榄石、云母、磁铁矿、钛铁矿和铬尖晶石等。此外, 尚有玄武岩屑, 有时还出现刚玉、锆石和石榴石等陆源碎屑矿物等。粘土矿物主要由蒙脱石、伊利石、绿泥石和高岭石等组成。生物组分主要由生物遗体和生物碎屑组成。在 CCD 线以下的硅质沉积物区, 以放射虫、硅藻为主, 次为鱼牙、骨针、骨刺等生物遗骸。而 CCD 线以上地形较高的地区, 沉积物中含有孔虫和钙质超微化石, 水体越浅, 钙质生物含量越丰富。

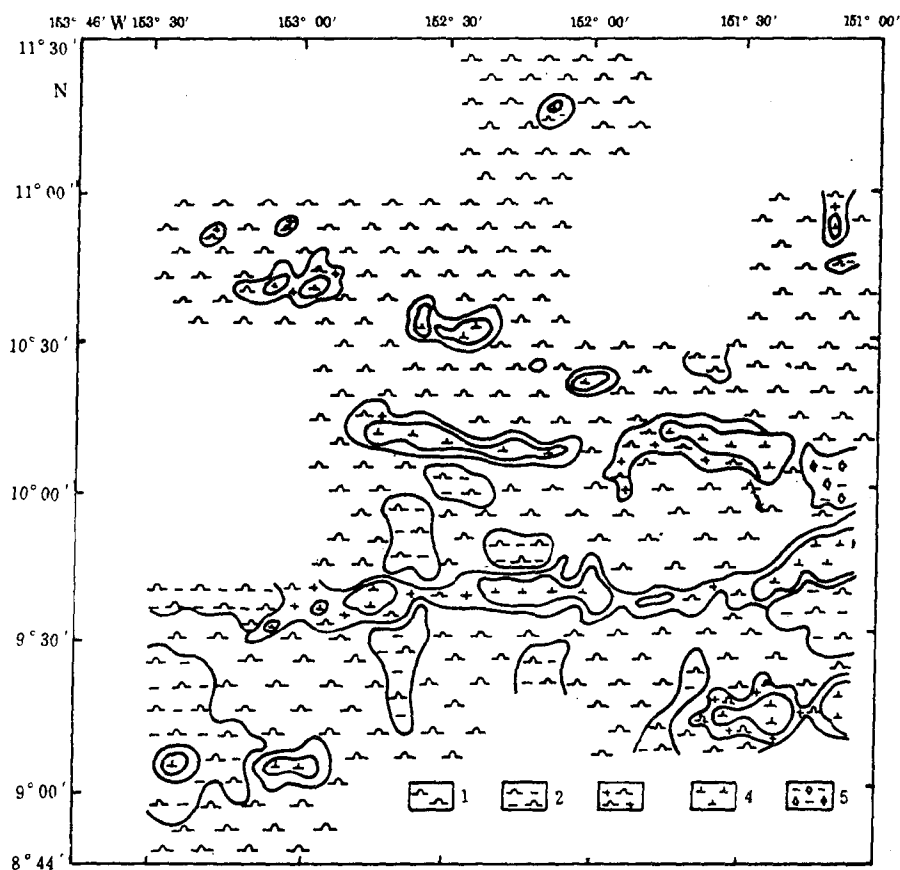


图 1-1 研究区西区表层沉积物类型分布图

1. 硅质软泥; 2. 硅质粘土; 3. 硅钙质软泥或含钙硅质软泥; 4. 钙质软泥; 5. 沸石粘土

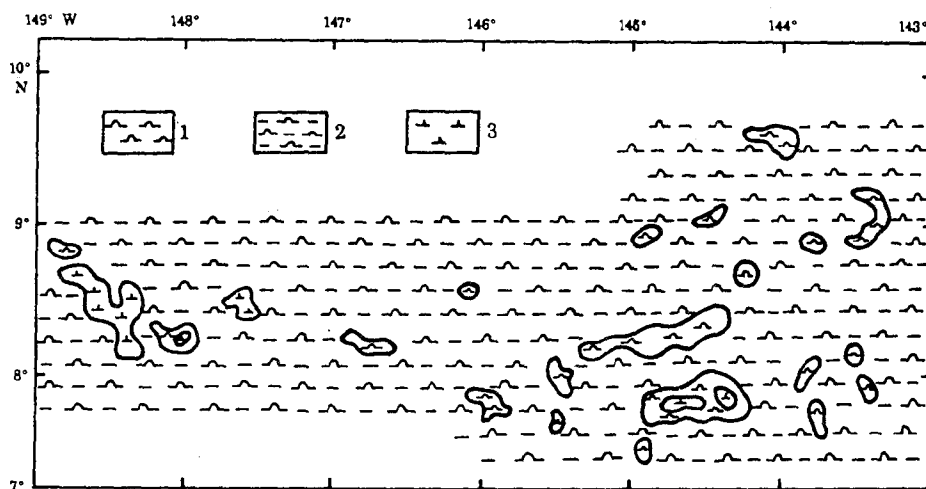


图 1-2 研究区东区表层沉积物类型分布图

1. 硅质软泥；2. 硅质粘土；3. 钙质软泥

四、多金属结核矿产

研究区内多金属结核的形态、类型和产出等，将在下面有关章节阐述。

这里仅着重指出，东、西两区结核存在明显的差别。东区以大中型结核占优势，并以半埋藏型为主，而西区则以中、小型半埋藏型连生体结核占主导。

结核类型分布特征与地形具明显关系，菜花状结核主要分布在丘陵区，碎屑状及各种连生体状的结核多数出现于海山区和高丘顶部。其他形态的结核均可赋存在各种不同地貌区，它们的分布量亦因而异。从赋存深度看，东部区略浅于西部区，前者通常为 4 800~5 300m，菜花状结核赋存水深，主要集中在 5 000~5 200m，浅于 4 000m 者多数为碎屑状和连生体结核。西部区结核赋存水深为 4 600~5 400m，但主要集中于 5 100~5 300m 之间。

东部区结核平均丰度为 $4.2\text{kg}/\text{m}^2$ 左右，品位较高，平均约为 2.7%；而西部丰度较高，平均约为 $5.6\text{kg}/\text{m}^2$ ，品位较低，平均为 2.2%。

结核内部的构造及其组成将在下面有关章节详述。

第二节 研究现状

一、关于结核的分类

不同的结核类型可反映其形成的特征。国内、外学者根据各自掌握的资料，对结核进行过各种分类，似乎所有的分类都以结核的大小、形态、表面结构和成因等 4 个因素为主要依据。Murray 和 Renard (1891) 根据 Challenger 160 个站位的结核样品将结核分成 3 个形态组：角锥状或不规则葡萄状、球状或椭球状和扁平乳头状。Coodell (1971) 将北太平洋结核分为 5 个形态组：球状、椭球状、板状或圆盘状、多边形、结瘤状。Meylan (1973) 根据结核大小、形态、表面构造、对称和共生关系将北太平洋结核分为 6 个形态组。Meylan 和 Craig (1974)

提出以结核的粒径大小、形态、表面结构为依据进行分类，并采用符号形式直观表达各种类型。Halbach 和 Ozkara (1978) 依据结核成因，将其分为沉积的、早期成岩的和混合的 3 种类型，但对结核形态表征上缺乏考虑。Glasby 等 (1982) 将赤道太平洋约 35km² 小范围结核分为：富铁的多核心结核、贫铁的单核心结核和混合型结核。

我国地矿部海洋四号船多航次调查报告中曾一度把太平洋中部结核分成 21 种类型，这是在 Meylan (1979) 分类基础上修改而成，基本上仍属形态分类。

综上述看出各种分类都有一定的局限性和缺点，最理想的方案应该是既简单又能醒目反映其形态、成因和环境的分类。为此，郭世勤 (1990) 在 86080 项目专题研究报告中根据太平洋中部结核特征重新归纳为 7 个主要类型：球状、椭球状、连生体、菜花状、杨梅状、板状、碎屑状 (含不规则形态) (表 1-1)。

表 1-1 研究区多金属结核分类

前缀：表示结核的大小	
大型 L>6cm	
中型 M=3~6cm	
小型 S<3cm	
主体：表示结核形态	
[S] 球状	[E] 椭球状
[P] 连生体	[C] 菜花体
[B] 杨梅状	[T] 板状
[F] 碎屑状	
后缀：表示结核表面结构和成因类型	
s 表面光滑，沉积成因型	
r 表面粗糙，早期成岩成因型	
s+r 表面光滑和粗糙，混合成因型	
例：M [S]：中型球状，表面光滑，沉积成因	
S [B]：小型杨梅状，表面粗糙，成岩成因	
M [C]：大型菜花状，上表面光滑，下表面粗糙，混合成因	

二、关于结核的内部构造

由于结核壳层矿物结晶程度很低，成分较复杂，所以研究的难度较大。最早对结核内部构造研究者，首推 Marray 和 Renard (1891)，随后是 Cameron (1961) 和 Arrhenius (1972) 拍摄了结核内部不同构造带；Burns 和 Fuerntenau (1966) 首次发现结核内不同构造带，其化学成分有别。Foster (1972)、Shima (1972) 将结核内部划分为块状构造、斑状构造、致密构造、柱状构造和层纹构造等。Cronam 和 Tooms (1968)、Heye (1975)、Burns (1978) 等对壳层构造成因等进行了研究，认为结核的壳层构造是后来次生改造作用所形成的，这种作用由外向内进行，因而壳层的构造发育、物质成分、结晶程度都是由外向内发生有规律的变化。Ana 等 (1988) 将结核构造分成球粒状、球粒-块状、均质、胶状、树枝状、蛋白石状等。

我国学者在这个研究领域上起步虽晚，但亦取得了较大的进展。单连芳 (1988) 将结核壳层构造分为：斑杂状、柱状、层纹状、脉状和鲕状；孔祥瑞 (1991) 细分出 17 种类型：环柱状、波状层纹、杂乱、平行间断、角度间断、同心壳层状裂隙、同心球状、放射状裂隙、不规则裂隙、龟甲状裂隙、简单脉状、对称脉状、梳状、龟背石、交代致密、交代残余和交代

生物等。梁德华等(1990)将太平洋中部结核内壳层构造归纳成六类:层纹构造、柱状构造、叠层状构造、致密块状构造、斑杂状构造和同心圆构造等,同时首次提出结核内部“构造层组”新概念。郭世勤等(1994)归纳出14种构造:微纹层、柱状、球状、树枝状、花瓣状、团块状、斑杂状、条带状、致密条带、不整合或沉积间断、裂隙及裂隙充填脉状、交代和交代残余等。许东禹等(1994)对结核壳层构造进行了成因形态分类,将构造分成原生构造和次生构造两大类,然后按成因类型再细分出形态类型。姚德(1994)提出了结核生长的自反馈“钟摆式”模型。

上述所有学者研究成果表明,各自带有一定的局限性,对形态和部分构造成因以描述性为主,对结核内部各构造层组的形成环境的探讨不够深入,对结核形成的环境因素看法不一。有的强调底层流是主导因素,认为柱状构造、层纹构造形成于底层流弱、环境相对稳定地区,而叠层状和斑杂状构造则形成于底层流强的地区。壳层中粘土微层成因尚难定论。此外,对结核内部构造类型组合特征,其空间分布与成矿规律之间的关系尚待更深入地研究。

三、关于结核内锰相矿物

多金属结核壳层物质组成主要包括锰相矿物、铁相矿物和杂质矿物,其中又以前者为主导,因此,对锰相矿物的研究就显得很重要。然而由于其结晶程度很低,而且不同矿物交生在一起,故给研究带来更大困难,据文献记载,锰相矿物不少于20种。Buser和Grutter(1956)首次对结核中锰矿物成分进行了鉴定,认为主要由 $10\text{\AA}$ 水锰矿、 $7\text{\AA}$ 水锰矿和 δMnO_2 组成。前苏联学者对太平洋结核中矿物的研究稍为详细,认为结核中锰矿物并非局限于上面三种,还有布赛尔矿、方锰矿、钴土矿—布赛尔矿混层等。“七五”期间地矿部86080项目有关的研究专题中初步确定,太平洋中部结核壳层的锰相矿物主要由钽镁锰矿(或称钙锰矿)(*todorokite*)、水羟锰矿(或称 δMnO_2)(*vernadite*)和钠水锰矿(或称水钠锰矿,*birnessite*)组成。

关于矿物相的变化(或转变问题),尚未定论。郭世勤(1994)认为:在结核壳层的致密带内钽镁锰矿和钠水锰矿是交代原生的水羟锰矿而成,而且通过实验表明,从室温增至 100°C 左右,钽镁锰矿由于失水可大量转变为水钠锰矿,温度进一步上升时,一部分钠水锰矿可转变为无序的水羟锰矿。

钽镁锰矿晶格呈隧道结构,而钠水锰矿和水羟锰矿为层状结构,是否用简单加热法就可以改变其晶格结构发生矿物相的转变,这是值得进一步探讨的问题。

第三节 研究内容和方法

一、研究内容

主要包括下述几项:

1. 多金属结核的形态成因类型

详细研究了结核的形态及成因类型,并进行了分类。特别对各种类型结核的分布规律及其与地形、环境的关系进行了讨论,从宏观上揭示了结核的成矿规律。

2. 多金属结核壳层构造

采集研究区内各种具代表性类型结核,通过形貌观察,切制光薄片,观察结核构造层的

宏观和微观构造、结核微层特征，并依此讨论了结核不同生长阶段壳层的形成环境及形成机制。

3. 壳层矿物组分

如前述，结核壳层矿物主要由锰相矿物、铁相矿物和杂质矿物组成。本专题着重对锰相矿物进行研究。特别是对构造层组中的铁锰矿物组合及其化学成分特征、变化规律进行了研究。一定的成矿环境有其相适应矿物的生成，因此，了解不同构造层组中矿物组合特征，就可窥悉其成矿环境。

4. 矿物相变化实验

为了探讨锰相矿物之间是共生关系还是相变关系，笔者以水羟锰矿和钙锰矿分别作为初始物质，进行了大量锰矿物相的实验。

5. 化学成分

重点分析结核构造层组内常量、微量元素含量特征。

二、研究方法

室内与海上调查相结合，生产与科研相结合，采用国内先进测试手段，并加强模拟实验等。

1. 矿物学研究技术方法

(1) 显微镜方法 用实体显微镜观察结核表面形态特征、化石遗迹；偏反光显微镜研究结核的内部结构、构造、成岩变化特征和矿物的光学特征。

(2) 透射电子显微镜 (TEM) 分析 研究结核内部构造、矿物形态，作微区化学成分分析。

(3) X 衍射 (XRD) 分析 主要用于鉴定矿物相。

(4) 红外光谱 (IR) 分析 用以确定锰矿物、硅酸盐矿物，并提供锰氧化物晶体结构的信息。

(5) 穆斯堡尔谱分析 确定结核中铁相矿物，并测定铁的氧化态。

(6) 原子吸收、X 射线荧光分析及化学全分析 研究不同类型及同一结核不同生长阶段的组分的化学成分。

(7) 电子探针分析 用以解决微区化学成分变化规律。

2. 实验

进行锰相矿物转变试验，模拟部分海底结核成矿条件，了解锰矿物晶体结构、相变特征。

第二章 多金属结核的类型及分布特征

本章系统地介绍了研究区多金属结核的形态、成因分类及其分布特征。

第一节 多金属结核的类型

一、分类原则

结核的形态千差万别，如上所述，国外不同的学者有不同的划分方案。但不论哪种分类，都以结核的大小、形态、表面结构、产出状态 4 个要素作为划分依据。Halbach (1979) 根据结核的地球化学特征（即 Mn/Fe 值）的不同将结核划分为 3 种成因类型，即成岩成因（A 型）、沉积（水成）成因（B 型）、混合成因（AB 型），这 3 种不同成因类型的结核产出状态不一，A 型以埋藏型为主；B 型为暴露型；AB 型即上部暴露、下部埋藏。

郭世勤（1992）提出的分类方案是根据我国矿区情况，并吸取前人合理部分，将结核的表面形态同成因密切结合，将最突出的形态特征作为主要划分依据，将繁多的结核形态分为五大类（表 2-1），笔者认为这种分类是可取的。

表 2-1 多金属结核形态类型

大 小	形 状	表 面 结 构
大、中、小	球状	光滑、粗糙、光滑-粗糙
	椭球状	光滑、粗糙、光滑-粗糙
	连生体状	光滑、粗糙、光滑-粗糙
大、中、小	碎屑状	光滑、粗糙
大、中、小	板状	粗糙、光滑-粗糙
大、中	菜花状	粗糙、光滑-粗糙
小	杨梅状	粗糙

二、研究区结核类型

（一）形态类型

为便于与以往研究成果的对比，本书拟采用表 2-1 的分类原则，将研究区结核主要分为七类：球状、椭球状、连生体状、碎屑状结核、板状结核、菜花状（包括盘状）结核、杨梅状结核，此外偶见生物状结核（图版 I）。

各类型结核主要特征概括于表 2-2 中。

1. 球状结核

表 2-2 各类型结核的主要特征表

类型	大小	表面结构	产出环境	化学成分	矿物成分	核 心 物 质	产 状	成因类型
球 状	中-小型	光滑-粗糙	西区丘陵	Fe 12.90%, Mn 22.77%, Cu+Co+Ni 1.56%, Mn/Fe 1.77	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	沸石、磷灰石、蒙脱石、蚀 变火山岩	暴露	沉积成因
椭球状	中型为主	光滑-粗糙 粗糙-粗糙	丘陵区	Mn 22.87%~29.07%, Fe 5.21%~8.96%, 少数 11.2%~12.56%, Mn/Fe 2.07~5.64, 少数 1.85%~1.88% Cu+Co+Ni 2.2%~2.92% 少数 1.80%~1.83%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	沸石化硅质粘土及硅质 软泥、老结核碎块、沸石 粘土等	暴露及 半埋型	沉积成因 混合成因
连生体状	大-中型	光滑-粗糙 粗糙-粗糙	主要分布 于西区海 山、海山 链、高丘	西区: Mn 17.99%~27.10%, Fe 8.69%~15.82% Mn/Fe 1.40~2.44 Cu+Co+Ni 1.46%~2.24% 东区: Mn 22.52%~26.10%, Fe 5.94%~13.01% Mn/Fe 3.02~4.44 Cu+Co+Ni 1.65%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	火山岩碎块、沸石化沉积 物团块、老结核碎块	暴露及 半埋型	沉积成因 混合成因
碎屑状	大-小型	光滑 光滑-粗糙	主要分布 于西区海 山、海山 链、高丘	西区: Mn 15.49%~23.70% Fe 8.08%~15.33% Mn/Fe 1.49~1.92 Cu+Co+Ni 1.41%~1.622% 东区: Mn 15.19%~29.12%, Fe 5.87%~8.89%, Mn/Fe 1.92~4.96, Cu+Co+Ni 1.73%~2.80%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	火山岩碎块、沸石团块, 沸石化沉积物团块,磷酸 盐	暴露及 半埋型	沉积成因
板 状	大-小型	光滑-粗糙 粗糙-粗糙	海山、丘陵	Mn 11.29%, Mn/Fe 1.57, Fe 7.18%, Cu+Co+Ni 1.14%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	沉积物、鱼牙	半埋	混合成因
盘 状	大-中型 为主,小 型次之	光滑-光滑 光滑-粗糙	西区丘陵	Mn 23.75%~27.56%, Fe 6.60%~12.19%, Mn/Fe 1.99~4.18 Cu+Co+Ni 1.94%~2.88%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	火山岩碎块、沉积物、老 结核碎块	暴露及 半埋	混合成因
菜花状	大-小型	光滑-粗糙 粗糙-粗糙	西区丘陵 区、形态不 标准、东区 分布广泛	西区: Mn 24.28%~28.67% Fe 5.31%~7.10%, Mn/Fe 3.68~4.49 Cu+Co+Ni 2.37%~3.20% 东区: Mn 24.02%~32.39% Fe 2.97%~8.71% Mn/Fe 2.92~8.71 Cu+Co+Ni 2.66%~3.26%	δMnO_2 为主, 次为钙锰矿	老结核核心居多,次为铁 锰物质、沸石化沉积物、 沸石团块、磷酸盐团块	半埋 ~ 埋藏型	混合成因 成岩成因
杨梅状	小 型	粗糙	深海平原、 槽谷	Mn 24.51%~28.96%, Fe 4.03%~5.91%, Mn/Fe 3.85~7.19, Cu+Co+Ni 2.67%~3.06%	钙锰矿多于 δMnO_2	火山岩碎块、沸石、沸石 化沉积物	埋藏	混合成因 成岩成因

外形呈球状,小—中型,表面光滑—细砂粒状。核心多为火山岩碎块,以单核为主,多核心者亦有。结核的 Mn/Fe 值小于 2,为沉积成因。与 CP 区球状结核的不同之处:个体稍小,表面相对粗糙。

2. 椭球状结核

结核以中型为主,次为大型或小型。结核顶面光滑、底面粗糙,属半埋藏型。这是与 CP 区椭球状结核的不同之处。

3. 连生体状结核

由球状、椭球状(少数呈似板状)的多个单体结核连生而成,以中、小型者居多。结核表面结构可分为两种:一种表面光滑,属暴露型;另一种则顶部光滑、底部粗糙,具砂状感,为半埋藏型。这类结核 CP 区较少见到。结核核心为火山岩碎块、老结核碎块、沸石团块等。结核表面常分布有沸石团块。属暴露型的结核,其铁的含量明显高于半埋藏型结核。结核主要分布于研究区西区。

4. 碎屑状结核

结核形态不规则,核心为沸石化的泥质团块、生物或其聚集体、火山岩碎块等,老结核碎块极少见到。其表面常附着沸石团块。结核以中型为主。研究区西区所见结核产状为暴露—半埋藏型,属沉积成因,其 Mn/Fe 值为 1.49~1.92;东区结核多为半埋藏型, Mn/Fe 值为 1.92~4.96。

5. 盘状结核

较少见到。顶、底低平,形状似盘状,其边部常呈花边状,实际上是不发育的赤道带,外形主要受核心形态影响,顶底可分,属半埋藏型。核心常为沸石化粘土、生物屑等,以中小型为主。

6. 板状结核

形态呈边缘不规则的薄板状,厚度一般小于 1cm。核心多为沸石化的硅质软泥,偶见以鱼牙为底板向上生长。研究区此类结核极不发育。产于海山区的此类结核表面较光滑、锰含量低(11.29%), Mn/Fe 值为 1.57 左右;产于深海丘陵及平原区的结核则顶、底一般均较粗糙、锰含量低(23.75%), Mn/Fe 值为 3.04。

7. 菜花状结核

主要分 2 种,一种结核顶底分明,顶部较底部光滑,赤道带发育,具豆状—瘤状聚集体;另一种则赤道带与顶底部渐变过渡,均布满瘤状体,结核顶面出露很少,近于椭球状。前者属于半埋藏型,后者则近于埋藏型。

菜花状结核主要分布于研究区东区,西区结核形态不标准,个体较小且极易破碎。东区结核的 Mn 、 Mg 含量及 Mn/Fe 值均高于西区。

8. 杨梅状结核

个体小,表面粗糙,有粗砂感,形态近于球形,核心多为蚀变火山岩碎块。属全埋成岩型结核。研究区此类结核不发育。

(二) 结核成因分类

本研究区拟采用 Halbach 等(1979)的成因分类方案,以 Mn/Fe 值作为划分依据,对结核进行成因分类。研究区西区的球状、连生体状、碎屑状结核的 Mn/Fe 值小于 2.5,属于沉积成因;椭球状结核 Mn/Fe 值为 2.07~5.64,属沉积成因与混合成因的过渡类型;菜花状结核的 Mn/Fe 值介于 2.5~5 之间,属于混合成因,当然这是就其整体而言,若对其上部、下