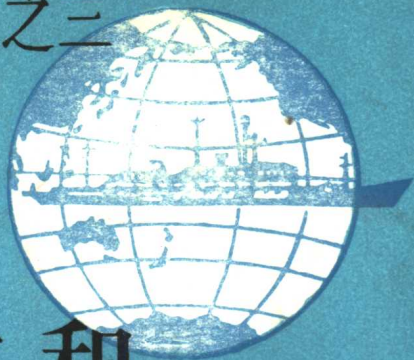


《太平洋中部多金属结核综合研究》之三



多金属结核和 沉积物的地球化学研究

郭世勤 吴必豪 卢海龙 等著

地质出版社



《太平洋中部多金属结核综合研究》之三

多金属结核和沉积物的 地球化学研究

郭世勤 吴必豪 卢海龙 等著

地质出版社

·北京·

(京) 新登字 085 号

内 容 简 介

地质矿产部“海洋四号”科学考察船于1986—1989年间在中太平洋和东太平洋海盆进行了大面积多金属结核普查。本书是利用考察所取得的大量样品和资料,通过多种室内分析测试手段和实验技术,在取得大批数据的基础上进行综合分析研究的成果。

本书通过对大量多金属结核和海底沉积物样品的常量、微量元素及稀土元素、稳定同位素分析,揭示了结核和沉积物中各种元素的丰度、分布规律、元素的相互关系、迁移富集规律,进而概括出多金属结核的成因和生长机制。书中的某些方法和观点有独到见解,对多金属结核调查、找矿、选矿、冶炼及丰富海洋成矿理论都有重要价值。

本书可供从事矿物、地球化学、海洋地质、矿床地质研究及多金属结核选冶工作的人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

多金属结核和沉积物的地球化学研究 / 郭世勤等著. —北京: 地质出版社, 1994. 11
(太平洋中部多金属结核综合研究之三 / 郭世勤等著)

ISBN 7-116-01772-0

I. 多… II. 郭… III. ①多金属结核—地球化学—研究 ②沉积物—地球化学—研究 IV. P736.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 13393 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑: 邢瑞玲 牟相欣

*

中国地质科学院 562 印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 10 字数: 240000

1994 年 11 月北京第一版·1994 年 11 月北京第一次印刷

印数: 1-500 册 定价: 9.85 元

ISBN 7-116-01772-0

P·1416

序

多金属结核是富含铁、锰、铜、镍和钴等有用金属元素的洋底自生沉积矿物集合体，自1873年2月18日在大西洋首次被发现以来，至今已有100多年的调查研究历史。第二次世界大战后，由于各国对金属资源需求量的增加，作为一种潜在矿产资源的多金属结核，日益受到各国政府、企业和学术界的重视。

60年代，我国开始注意到这种潜在矿产资源的重要性，并一直关注国际调查工作的进展和研究动向。为查明多金属结核的分布规律及其经济价值，促进海洋地球科学的发展，以适应我国经济建设的需要，“七五”期间地质矿产部开展了以多金属结核为重点的调查与研究工作。

根据地质矿产部的统一部署，调查工作由广州海洋地质调查局负责组织实施。1986-1989年间，“海洋四号”调查船在太平洋中部 $7^{\circ}-12^{\circ}\text{N}$ ， $176^{\circ}\text{E}-178^{\circ}\text{W}$ （CP区）和 $7^{\circ}-14^{\circ}\text{N}$ ， $138^{\circ}-152^{\circ}\text{W}$ （CC区）的范围内进行了四个航次的调查，历时580天。调查面积约130万平方公里，共设地质测站669个，其中8个测站还进行了温度、盐度、深度（CTD）的系统测定，完成地球物理测线达27万公里，为资源评价提供了可靠的科学依据。

研究工作由地质矿产部海洋地质研究所协调各单位共同完成。这些单位是广州海洋地质调查局，上海海洋地质调查局，中国地质科学院矿床地质研究所、地质研究所、水文地质工程地质研究所、岩矿测试技术研究所、成都地质矿产研究所。

通过海上调查与室内研究相结合，宏观与微观相结合，对多金属结核及沉积物等样品进行了多学科的综合分析，获得了以下几方面的成果：

建立了太平洋中部早新世以来的岩性地层、生物地层、磁性地层和化学地层序列，恢复了碳酸盐补偿深度、沉积间断和古气候等古海洋环境和事件；

查明了太平洋中部表层和柱状沉积物的类型、组分及其分布特征，以及其中陆源、火山源、生物源、自生和宇宙物质的矿物及地球化学特征；

在探讨多金属结核类型、丰度、覆盖率和品位与海洋水深、地形和沉积物类型关系的基础上，查明了结核的空间分布规律；

确定了多金属结核生长期或生长世代及其与古海洋演化史的关系，探讨了不同世代结核的时空分布规律；

查明了多金属结核中铁、锰矿物相，常量、微量、稀土及放射性元素分布特征和相互制约的关系，以及它们的区域分布同水深、地形、沉积物类型以及氧化还原条件等海洋环境的关系；

在前人研究的基础上，对多金属结核成因的地球化学判别标志作了深入的探讨，认为除结核中主要元素和 Mn/Fe 比值可作为成因判别标志外，稀土总量以及Ce异常强度，也可作为判别结核成因的重要标志；

通过模拟试验，验证了结核中成矿元素的迁移、富集以及结核生长过程中的微生物作

用，认为氧化作用、胶体化学作用是结核生长的主要机制，而生物化学作用促进了上述两个作用的进程。

上述是我国在深海远洋地质矿产调查研究领域里取得的前所未有的重要科学成果，它无疑是我国海洋地质科学发展史上的重要里程碑。

为及时进行交流，促进科学事业的发展，我们决定将这些成果分为10册陆续出版。这10册是：一、多金属结核的分布规律；二、多金属结核的特征及成因；三、多金属结核和沉积物的地球化学研究；四、多金属结核主要元素的地球化学行为；五、太平洋中部沉积物的矿物组成与沉积作用的研究；六、太平洋中部水文地球化学特征；七、太平洋中部水-岩系统中微生物活动及其成矿作用；八、微体生物与多金属结核的生物成矿作用；九、太平洋中部晚新生代古海洋环境及事件；十、太平洋海盆微结核研究。

虽然我们已取得了显而易见的成绩，但由于我国深海远洋的地质矿产调查和科学研究工作刚刚起步，某些领域与国际先进水平还存在一定的差距，对有些问题的认识还有待进一步深化；加之受作者水平所限，书中难免有疏漏或不妥之处，谨请读者指正。

许东禹 金庆焕 梁德华

1991年10月

前 言

世界大洋中广泛分布着以 Mn、Fe 为主要成分的结核，本书称之为多金属结核。自 19 世纪末英国的“挑战者”号在大西洋首次发现多金属结核，至本世纪 80 年代联合国国际海底管理局筹委会批准第一批先驱投资者，此间进行的大量调查工作已初步查明了多金属结核的分布规律。在太平洋中部，多金属结核富集区呈东西向带状分布，与赤道附近沿纬向分布的硅质粘土和硅质软泥沉积基本吻合。该区恰好位于克拉里昂和克利帕顿二大断裂带之间（本书称为 CC 区），向西延伸至中太平洋海盆（本书称为 CP 区）。目前所知，该富集区是世界各大洋中最具有开发远景的地区。这个区域内多金属结核丰度一般大于 $5\text{kg}/\text{m}^2$ ，覆盖率超过 50%，且 Cu、Ni、Co 的总含量达 2%—3%，如此丰富的海洋资源自然不会永远被埋没。从 60 年代末至 80 年代初，以美国为首的四大国际财团（海洋采矿协会（OMA）、海洋管理公司（OMI）、海洋矿产公司（OMGO）和肯尼科特财团）、前苏联、日本、法国、英国、以及德国的矿业公司或地质机构在该地区进行了大规模的调查研究，先后获得了先驱投资者资格或划分了保留区。随着调查活动的广泛进行，开展了以多金属结核为中心的科学研究工作，涉及地球化学、矿物学、沉积学、古海洋学、水文学、生物学、构造地质及地球物理等学科领域。

我国国家海洋局的远洋调查船 70 年代曾在太平洋中部地区采集到多金属结核。1983 年“向阳红 16 号”在中太平洋进行了专门的多金属结核航次调查。从 1986 年至 1990 年期间，我国的“海洋四号”和“向阳红 16 号”科学考察船在 5 年期间共进行了 8 个航次的系统概查工作。地质矿产部还同时组织了“太平洋中部多金属结核的调查与研究”综合科学基金项目，下设 19 个课题，分别涉及多金属结核分布规律、矿物、地球化学、生物活动、沉积物组成、沉积史、微结核、宇宙尘及地球物理等方面。“太平洋中部多金属结核和海底沉积物地球化学”为该项目的一级课题之一。研究报告经地质矿产部石油地质海洋地质局系统、中国地质科学院、中国地质大学、中国科学院等单位的专家审查，于 1990 年 7 月通过评审。本书是在研究报告基础上做了进一步的补充和修改而成的。

多金属结核的成分十分复杂，除 Mn、Fe 以外，含量在 10^{-6} 以上的元素有 50 多种，其中 Cu、Ni、Co 可分别达到工业品位，Pb、Zn、Mo 和稀土元素也具综合利用价值。不同海域、不同地貌单元、不同成因的结核，其元素种类和含量有较大变化。本书分章节讨论了结核和沉积物中常量元素、微量元素（包括稀土元素）的丰度、分布规律、富集方式和赋存状态等问题，还利用同位素、元素比值等多种方法讨论了物质来源、沉积条件；最后综合讨论了多金属结核的成因。

我国是资源大国，也是人口大国，人均资源占有量低于世界平均水平，某些矿种仍较紧缺，因此，多金属结核中的 Cu、Ni、Co、Mn 等正可弥补某些矿产的不足。自 1991 年 3 月 5 日中国大洋矿产资源研究开发协会被联合国国际海底管理局筹委会批准为深海采矿先驱投资者以后，我国的深海采矿活动逐渐受到国内外的关注。本书的出版可以帮助读者了解海底多金属的资源状况，结核和共生沉积物的基本地球化学特征，多金属结核的成

因与生长机制。为克服以往地球化学研究中的不足，我们特别加强了下列几方面的工作：

1. 开展或试验性地引进一些更为有效的手段，如稀土元素地球化学，Sr、Pb 同位素地球化学和碳、氢、氧稳定同位素地球化学研究，以便更好地了解、探讨多金属结核的形成环境和物质来源。

2. 扩大元素研究范围，使被测元素达到 56 个，为探寻元素与热液或其他作用的关系提供条件。

3. 开展元素迁移和成岩作用的研究。

4. 在研究多金属结核地球化学的同时，加强沉积物地球化学的研究工作。

5. 定量研究元素在结核和沉积物中的赋存状态，为深入了解元素的析出和富集机理提供依据。

地质矿产部石油地质海洋地质局张瑞祥、肖汉强、武德运，广州海洋地质调查局王光宇、金庆焕、梁德华，青岛海洋地质研究所许东禹、徐脉直等先生对该项研究工作给予了极大的支持和帮助，借本书出版之际谨向他们表示衷心的感谢。

本书系集体研究成果，共分九章。前言由郭世勤执笔；第一章由吴必豪、卢海龙、郭世勤执笔；第二章由郭世勤、杨慧宁执笔；第三章由郭世勤、孙文泓执笔；第四章由吴必豪、卢海龙执笔；第五章和第六章的多金属结核部分由郭世勤执笔，沉积物部分由吴必豪、卢海龙执笔；第七章由吴必豪、王成玉、卢海龙执笔；第八章沉积物部分由李松筠、陈永志执笔，多金属结核部分由郭世勤执笔；第九章由郭世勤执笔。吴必豪研究员审阅了全书初稿，最后由郭世勤统编完成。

李松筠、李兴、陈永志还完成了赋存状态分析和有机碳分析；王成玉完成了碳、氢、氧同位素分析；陈永志、袁宁、尚相如协助完成了数据的计算机处理工作。孙文泓、卢海龙还对该项研究所用全部样品进行了整理、记录和描述。

此外，地质矿产部岩矿测试所阙松娇等完成了等离子质谱分析，史世云等完成了湿化学分析；地质所王学英完成了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定；矿床所周国容协助完成了部分图件清绘工作，在此一并致谢。

多金属结核和共生沉积物地球化学的系统研究在我国尚属首次。由于样品数量及研究区范围有限，加之研究周期较短、著者水平所限，错误疏漏难以避免，恳请阅者指正。

目 录

序	
前言	
第一章 太平洋中部海洋地质背景	(1)
第一节 研究区地理位置.....	(1)
第二节 多金属结核调查研究简况.....	(1)
第三节 研究区地形、地质基本特征.....	(2)
第四节 大气环流与洋流.....	(5)
第二章 多金属结核和浅表层沉积物的一般特征	(8)
第一节 多金属结核的形态、结构构造和矿物成分.....	(8)
第二节 浅表层沉积物的一般特征.....	(15)
第三章 多金属结核常、微量元素地球化学	(19)
第一节 多金属结核中常、微量元素的丰度及区域变化.....	(19)
第二节 多金属结核类型及其化学成分.....	(25)
第三节 多金属结核内部化学成分的变化.....	(28)
第四节 多金属结核中元素的相互关系.....	(31)
第五节 多金属结核中主要金属元素的来源.....	(36)
第四章 沉积物常、微量元素地球化学	(43)
第一节 沉积物中生物组分地球化学.....	(43)
第二节 沉积物中的常、微量元素.....	(47)
第三节 生物组分及常、微量元素的地质意义.....	(57)
第五章 稀土元素地球化学	(60)
第一节 多金属结核中的稀土元素.....	(60)
第二节 沉积物中的稀土元素.....	(72)
第六章 多金属结核和沉积物的铀、钍、铅、镭地球化学	(83)
第一节 铀、钍地球化学.....	(83)
第二节 铅及其同位素地球化学.....	(92)
第三节 镭及其同位素地球化学.....	(97)
第七章 沉积物及多金属结核的稳定同位素地球化学	(101)
第一节 样品分析方法.....	(101)
第二节 沉积物的稳定同位素.....	(102)
第三节 多金属结核的稳定同位素.....	(108)
第八章 元素赋存状态	(113)
第一节 沉积物中元素的分析方法及赋存状态.....	(113)
第二节 多金属结核中元素的赋存状态.....	(118)

第三节 稀土元素赋存状态·····	(121)
第四节 元素的沉积富集机制·····	(123)
第九章 多金属结核形成机制初探·····	(126)
参考文献·····	(134)
英文摘要·····	(141)
图版说明·····	(147)
图版·····	(149)

第一章 太平洋中部海洋地质背景

第一节 研究区地理位置

地质矿产部海洋四号科学考察船 861、871、881 和 891 航次在太平洋中部进行了大面积的以多金属结核为目的的调查活动。861 航次调查范围为 $7^{\circ}-12^{\circ}\text{N}$, $176^{\circ}\text{E}-178^{\circ}\text{W}$ 。该区位于中太平洋海盆 (简称 CP 区) 西部。871 航次工作区位于东太平洋海盆, 其东部为东太平洋中脊, 西部为莱恩岛链, 北部、南部分别以克拉里昂 (Clarion) 和克利帕顿 (Clipperton) 断裂带为界 (简称 CC 区), 坐标范围大致为 $9^{\circ}00'-14^{\circ}30'\text{N}$, $138^{\circ}-148^{\circ}\text{W}$ 。881 和 891 航次基本限制在 CC 区内, 但向南扩展至 7°N , 向西延伸至 153°W , CC 区可进一步划分出 CCA、CCB、CCC 三个重点工作区 (图 1-1)。本书涉及的样品都是“海洋四号”在 CP 区和 CC 区采集的。

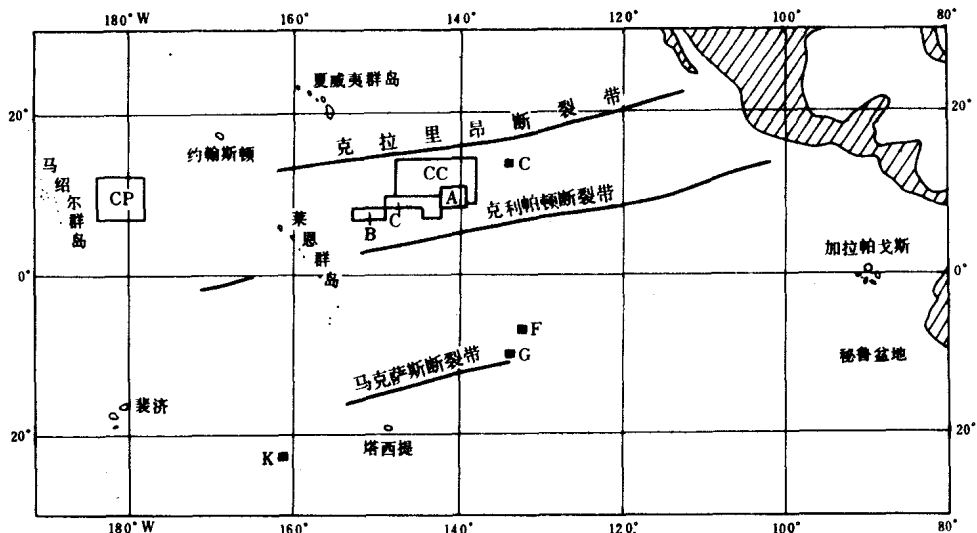


图 1-1 研究区地理位置示意图

第二节 多金属结核调查研究简况

本世纪 50 年代后期, 美国、前苏联等工业发达国家已积极着手现代海洋地质调查。1964 年前苏联率先编出“太平洋锰结核分布图”, 并于 1966—1970 年, 出版了一系列有关太平洋地形、构造、地质、化学、间隙水和沉积作用等方面的专著。之后, 在详细研究赤道北太平洋众多区段多金属结核的基础上, 又于 1986 年发表了“太平洋中部铁锰结核”的研究报告。

美国 25 所大学从 1972 年开始实施了“大学间锰结核研究计划”，并出版了《Inter-University of Research on Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor》研究报告。从 1968 年开始执行的深海钻探计划，使海洋地质科学产生了革命性的变化。该计划在太平洋中部及邻区共打了三十多个钻孔，为真正了解本区多金属结核形成的基础地质背景提供了科学的依据。

1975 年美国海洋大气局在 CC 区选择了三个小区，进行与多金属结核分布和资源评价有关的海洋物理、生物、化学和地质综合研究，称为 DOMES 计划，并于 1979 年出版了《Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province》一书。目前美国已完成了多金属结核调查并在 1981—1986 年实施了“锰结核研究计划”。

日本深海矿物资源开发协会和日本地质调查所在 70 年代中后期和 80 年代初期对太平洋多金属结核进行了较系统的调查研究，主要集中在中太平洋海盆和 CC 区，并出版了一系列航次报告。

前西德从 1968 年以来实施了四个“海洋研究和海洋技术”计划，对赤道北东太平洋和中太平洋的多金属结核资源和基础科学进行了调查和研究。

法国自 1971 年开始，由多金属结核调查研究协会利用“查科特”号在南太平洋和赤道北东太平洋地区结核富集地带，也进行了资源调查和科学考察。

早在 50 年代末期，中国科学院和地质矿产部就已经在近海进行海洋资源调查，而深海多金属结核调查则开始于 70 年代后期，这一工作由地质矿产部和国家海洋局组织实施，至今已完成 10 个航次的调查任务。

第三节 研究区地形、地质基本特征

一、CC 研究区

CC 区界于北部的克拉里昂和南部的克利帕顿转换断层之间，东起东太平洋中脊西麓，西至莱恩群岛（图 1-2）。

CC 区地貌可大致分为以下几部分：

破碎带地貌区 位于 CC 区最北部，克拉里昂断裂带南翼，由东北向西南绵延，地形起伏大，幅度约 400—600m，最大达 1000m。

海山区 大致范围在 $10^{\circ}30'$ 以北，主要由高差大于 500—800m 的海山构成，近东西向排列，大部分地区水深小于 4900m。

台地区 位于北部山区之南，大致在 $9^{\circ}N$ 以北， $141^{\circ}W$ 以西由 5000m 等深线所环绕的地区，平缓起伏的低丘陵广泛分布。

丘陵区 大致在 $9^{\circ}30'N$ 以南， $142^{\circ}W$ 以西的范围，水深在 5000—5200m 间，主要由高差 100—300m 的丘陵构成，地势东高西低，而且有自北往南递降后再升高的趋势。

低丘区 位于丘陵区的东南部，地理位置是 $7^{\circ}-9^{\circ}N$ ， $142^{\circ}-153^{\circ}W$ 。主要由高差小于 100m 的低丘构成，水深在 5000—5200m 间。地形高度也是由东往西，由北往南逐渐下降。

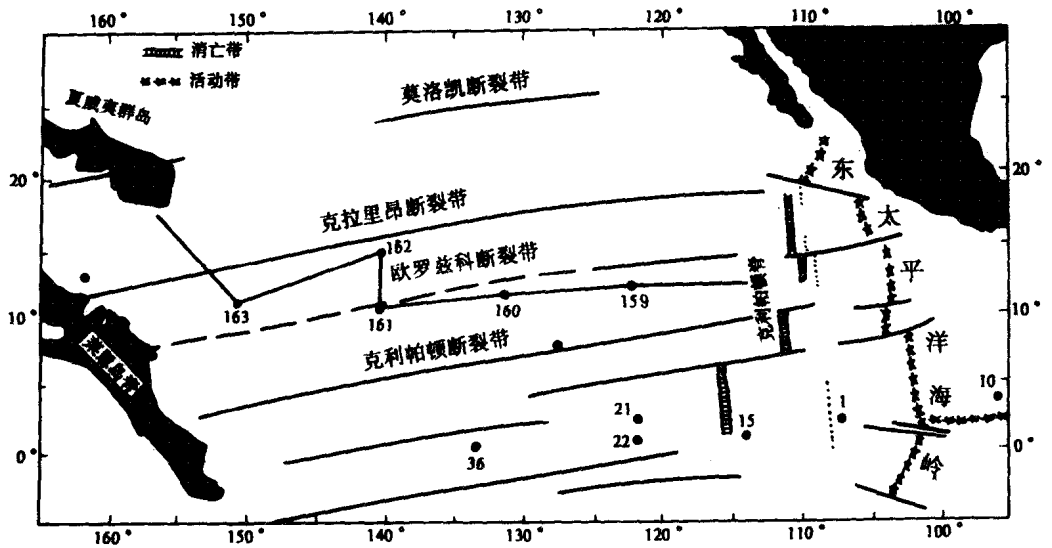


图 1-2 CC 区构造纲要图

(图中黑点及编号代表深海钻孔位)

CCA 区属海山区和台地区，CCB 区和 CCC 区分别属于丘陵区 and 低丘区。

CC 区最主要的构造是克拉里昂和克利帕顿两条转换断层，CC 区也由此而得名。在上述两条断层之间，还存在另一条转换断层，即东太平洋中脊东侧欧罗兹科 (Orozco) 转换断层向西部的延伸。在 CC 区还存在一些近 NNW 向 (平行于扩张轴)、NEE 向 (平行于转换断层) 及 NE 向断层。它们是洋中脊和转换断层的次一级构造。克拉里昂和克利帕顿均为断层面向北倾斜的正断层，断层北翼 (上盘) 下降，南翼 (下盘) 上升。克拉里昂断层南北两侧高差为 300—400m，克利帕顿断层两侧相差 270—360m。应该指出的是，这些断层的上升盘总是形成破碎带地形，而下降盘则呈低丘盆地或深海平原。

上述断裂构造还对火山活动起着重要的控制作用，如在断层东部地堑中，就分布着许多海底火山和火山岛屿，其形成从第三纪晚期持续至今。

由于板块的扩张和沉降，CC 区由拉班玄武岩组成的沉积盖层基底，其形成时代从东向西变老。而沉积盖层厚度从东向西增加；沉积作用开始的时间也相应由晚变早。

CC 区西部晚白垩世 (73Ma B.P.) 沉积了含超微化石的碳酸盐，至 73—65Ma B.P. 时，由于板块沉降，该区处于 CCD 线 (碳酸盐补偿深度) 之下，而沉积了薄层沸石粘土。

古新世沉积缺失。早始新世含硅碳酸盐只出现在克拉里昂断层以北。

中—晚始新世沉积广泛分布于 135° W 以西地区，其底部是活动裂谷带热液喷气沉积的含金属粘土；向上是洋中脊侧翼含超微化石的碳酸质粘土和硅质软泥。

渐新世时，以 140° W 为界，西部沉积了深海沸石粘土；东部处于 CCD 线之上，沉积了钙质或硅钙质沉积物 (Левитан, 1980)。在 130° W 附近地区的渐新统剖面，底部出现含金属软泥，直接覆盖于玄武岩之上，表明它接近扩张轴。

早—中中新世时，CC 区及克利帕顿断裂之南沉积环境发生了重大变化，形成大量的

超微化石软泥，沉积速率最高达 40mm / 1000a，反映古赤道带随着年龄变新而向南迁移。但至早中新世末期 CC 区的碳酸盐沉积即行停止，生物成因的硅质沉积也减弱。

中—晚中新世时，由于生物生产力低，CCD 线升高和南极低流活动加强的环境，致使 CC 区经常缺失中中新世和晚中新世沉积。

更新世时，CC 区位于生物生产力高的现代放射虫带，沉积了厚度变化极大的硅质粘土或硅质软泥，厚度通常只有几十厘米。这些软泥的形成环境接近于现代；在形成时间上，有些地区属中晚更新世，另有一些可能属上新世。软泥的主要组成是生源物质，故其沉积速率及沉积物的绝对量首先是受生物生产力控制。CC 区北部 11°—13° N，原始生产力急剧减少，正好是硅质软泥（南部）与深海粘土（北部）的过渡地带（Скрякова, и др., 1971）。赤道高生产力带的北缘位于 CC 区 11° N 以南，这里的原始生产力比较低，变化也较大，一般只有 0—2mg / m² / d。

CC 区第四纪沉积物厚度剧烈变化的主要原因，通常认为是南极底层流和重力流对沉积物的强烈侵蚀和再沉积所致。

二、CP 研究区

CP 研究区即中太平洋海盆区，位于 0°—17° N，170° E—160° W 范围内。该区东临莱恩岛链（Line Islands Ridge），西界马绍尔岛链（Marshall Is.），北濒中太平洋海山群（Mid-Pacific Mts.），南达马尼希基高原（Manihiki Plateau），大致呈一菱形。

CP 区海底地貌比较复杂，巨型海丘和海槽发育，总体上有自东向西倾斜的趋势，东部水深小于 5500m，西部大于 5500m（Удинцев, 1972），大致可分出三个地貌单元：

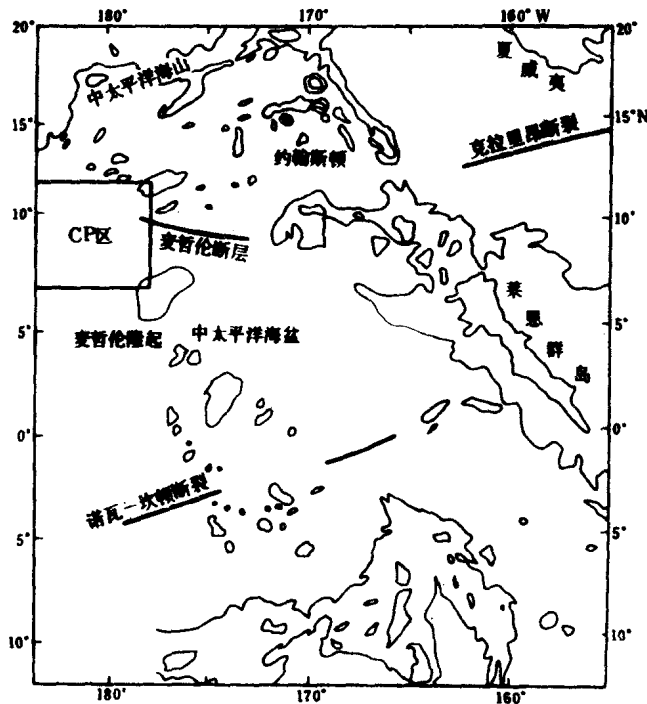


图 1-3 CP 区地质构造简图

西北深水平原区 位于 CP 区西北部，海底地形平坦，一般水深 5800m。

西南海山区 大致位于 11°N 以南, 地形崎岖不平, 海山呈线状排列, 为 NWW 走向。海山顶水深 3500—4500m, 山间海槽可达 5900m。

中—东南部深海盆地区 为东北海山和西南海山所环抱, 水深变化较大, 一般界于 4500—5400m。在海底丘陵的基础上, 存在深而狭长的海槽, 深 5600—5700m, 10°N 以南地形趋于平缓。

CP 区较大的构造是: 诺瓦-坎顿 (Nova-Canton) 断层和麦哲伦 (Magellan) 断层, 以及麦哲伦 (Magellan) 隆起 (见图 1-3)。

上述两断裂可能是克利帕顿和克拉里昂断裂的延伸 (米纳德, 1964)。

CP 区西南侧为平行于马绍尔群岛的近南北向的堤状高地与凹地, 东北角为走向 290° — 300°NW 的狭窄的线状地堑与地垒频繁相间出现。盆地中部为麦哲伦高地。

火山活动与上述构造有密切联系, 海盆内及周缘火山林立, 其极盛时期是晚中生代至早中新世时期, 某些火山迄今仍有活动。

CP 区最早的沉积始于白垩纪, 为深海环境沉积, 此后 CCD 线深度曾发生多次变化。

早第三纪初期出现区域沉积间断。从中始新世开始, 结束区域性间断, 开始沉积生物碳酸盐、含硅碳酸盐及深海粘土。至早中新世时, 沉积速率最大。中中新世后沉积速率变缓, 并出现局部沉积间断。更新世时放射虫带重新扩大, 在 CCD 线以下发育着硅藻放射虫软泥 (盆地南部), 从 10° — 12°N 往北, 相变为半深海粘土, 厚度都很小。但在海丘、海山区, 处于 CCD 线以上的地方, 仍有碳酸盐沉积。

由于地形的强烈切割, 在底层流与重力流作用下, 常导致老地层的侵蚀和再沉积, 尤其是在放射虫带北缘。在局部洼地和断层谷底常有前第四纪深海粘土和沸石粘土出露。

第四节 大气环流与洋流

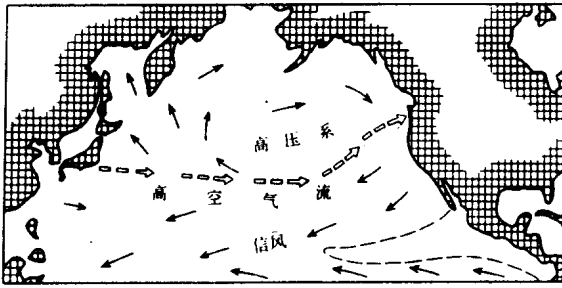
一、大气环流

北太平洋夏季大气环流包括下列四个主要方面: (1) 受中心在太平洋东北部的一个大范围高压系所控制, 环绕着它产生顺时针运动的气流可扩展到整个东北太平洋, 成为吹向亚洲的向岸风; (2) 北纬 30° 以南来自东面的信风 (东北风), 控制着太平洋中部洋面的大气环流; (3) 在赤道地区, 由赤道东北和东南两种信风的汇聚, 形成了赤道无风带 (风力微弱, 风向不定); (4) 在 10—12km 高空还有来自亚洲的气流, 其速度为 18m/s , 到开阔大洋上增至 22m/s , 是控制悬浮颗粒向大洋搬运的主要营力 (McCoy 等, 1988)。

冬天的大气环流情况明显不同, 一是存在于堪察加半岛外的一个低压槽扩展到北太平洋的大部分地区, 并且产生直到 600m 高的地面风 (由中亚、北亚吹来); 二是在大约 3000m 高空处, 有西风带从中、南亚吹来; 三是在墨西哥岸外存在着一个小的低压槽, 槽南及赤道带有来自东部的信风, 在冬季最强, 赤道无风带也还存在; 四是高空气流的路线相对南移 (图 1-4)。

由此可见, 无论是夏季或冬季, 来自亚洲的高空气流, 西风带、地表或洋面风与来自北美的信风, 环绕高压系的大气环流, 都可给 CC、CP 两区带来陆源及火山喷发的碎屑物质。

A 夏季大气环流



B 冬季大气环流

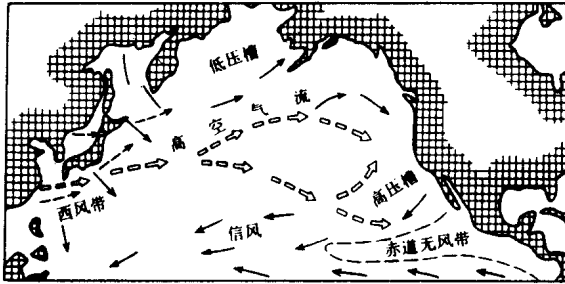


图 1-4 大气环流图

1982)。上升流通常含有比原来海水更高的营养物质，可促进该区生物生产力的提高，从而增加了生物遗骸向海底的沉积。

三、南极底层流

南极底层流 (AABW) 是在南极罗斯海形成的一种富氧、低温、低速的水体。它由

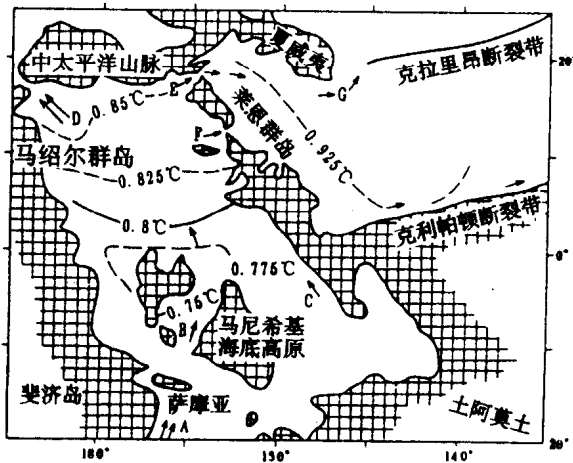


图 1-5 南极底层流流动方向及水温图

(据 Johnson, 1972, Lonsdale, 1980)

新西兰南部进入太平洋，然后作为一种西部边缘流在汤加-克马德克海沟的西侧和路易斯维拉脊之间向北流动，继而底层流通过萨摩亚东北端的狭窄通道进入北太平洋 (见图 1-5)，其中的一个分支流过中太平洋海盆后，通过马绍尔群岛和中太平洋海山之间向西继续流动；另一分支沿着莱因岛链的西侧向东北方向流动，并且在霍里宗及莱因岛链与克拉里昂断裂带交界处分别越过莱因岛链，然后，一部分沿着夏威夷群岛的东端转向北流，一部分进入 CC 区。在 CC 区控制着南极底层流活动的主要是克利帕顿断裂带 (Johnson, 1972) 和海盆

二、大洋环流

大洋环流是影响海洋生产力的

重要因素，也是控制着陆源碎屑

(包括风成碎屑和大陆径流带入的

悬浮体) 及海洋生源物质分布的主要

营力。生物种类多少及沉积物类型

均与环流有关。存在于北太平洋的

表层环流，主要是阿拉斯加流，

加利福尼亚流，北太平洋及北赤道

流 (McCoy 等, 1988)。与热带、

亚热带海区有关的洋流呈顺时针方

向运动。与 CC 和 CP 两区关系更

为密切的是赤道洋流，该洋流又可

细分为三部分：在信风影响下向西

运动的南、北赤道流；在赤道无风

带下向东流动的赤道逆流；值得注

意的是沿着赤道逆流北缘的风系在

赤道地区产生的上升流 (Kennett,

运而造成地层缺失。

底层流的侵蚀能力，与冰期密切相关，其作用包括物理和化学两个方面：即在冰期时极地冷而重的海水大量产生并下沉，使其流速加快，从而增加了冲刷和搬运能力。底层流源源不断来自南极冰棚表层水，因而富 O_2 及 CO_2 ，使其兼具溶蚀和增强生物繁殖二种能力。由于生物的呼吸和死亡分解，可使其在运移途中 CO_2 不断增加，导致南极底层流具有更大的侵蚀能力。又由于与正常大洋水不断混合，使自身温度不断上升，含氧量缓慢下降，因此，越远离源头，它的氧化性质越弱。如前所述，南极底层流跨过赤道后首先进入中太平洋海盆，而后向东的分支进入 CC 区，所以 CP 区较 CC 区处于更强的氧化环境。可见南极底层流是控制结核生长、决定结核矿物和化学组成的重要因素之一。

第二章 多金属结核和浅、表层沉积物的一般特征

第一节 多金属结核的形态、结构构造和矿物成分

多金属结核作为一种沉积矿产，广泛分布于世界各大洋中，但最具开采利用前景的地区是在北太平洋，即北纬 $6^{\circ}30'$ — 20° N，西经 110° — 180° W 的带状区域内（CC 区）。该区不仅多金属结核的蕴藏量丰富，结核中 Cu、Ni、Co 等最具经济价值的元素的含量也较其它地区高。结核在海底的分布极不均匀，即使小范围内也是如此。

大部分结核产于海底沉积物表面。通常认为，北太平洋海区，多金属结核在沉积物—水界面上出现的频率约为 90%，向下急剧降低。据“海洋四号”调查结果，在柱状沉积物样品中只发现了少数几粒结核。

一、多金属结核分类

1. 结核形态和成因分类

许多研究者曾对大洋多金属结核进行过分类尝试，如 Goodell 等（1971）、Meyer（1973）、Meylan（1974）、Halbach 和 Ozkara（1979）、Dymond（1984）等。概括上述作者的分类情况，我们认为多金属结核分类主要应考虑结核大小、形态、表面特征和成因类型四个因素。对结核成因分类目前有二种见解。Halbach 等（1979）划分了三种成因类型：水成结核（B 型）、成岩结核（A 型）和混合成因结核（AB 型）。Dymond（1984）也划分出三种类型：水成结核（相当 B）、氧化成岩结核（相当 A）和亚氧化成岩结核，后者未把 AB 型单独划出，但增加了亚氧化成岩类型。CC 研究区内不存在亚氧化成岩类型。

根据现场观察和分析，作者将太平洋中部的多金属结核按形态划分为球状和球状连生、板状、菜花状和杨梅状四种类型（图版 1）。其主要特征见表 2-1。

球状和球状连生结核主要产于 CP 区和 CC 区的海山区，其它三类结核分布于 CC 区的平原、丘陵地带。

2. 乳浊层与多金属结核成因

Halbach（1986）曾提出 Peneliquid layer 的概念，是指沉积物—水界面以下 5—30cm 的未固化沉积物。Sorem 等（1979）提出的 Nepheloid layer 和 Hein 等（1979）的 Interface boundary layer，也没有给出确切的含义。本书提出的乳浊层是指位于沉积物—水界面之间的一个特征层位，厚度约数厘米不等，它相当于 Halbach 的未固化的沉积物之上的层位。该层的性质介于固体与液体之间，是由水溶液与呈悬浮状态的微粒物质所组成。其成因可能是粒度极细的（小于 $1\mu\text{m}$ ）悬浮微粒在动荡的底层水中不易下沉固结而较长时间保持高密度半悬浮状态的结果。

乳浊层的地球化学特征与底层海水和下伏固结沉积物都不相同。它是一个缓冲带或地