

《太平洋中部多金属结核综合研究》之十



太平洋海盆微结核研究

李 扬 梁德华 郭世勤 孙文弘

地质出版社

《太平洋中部多金属结核综合研究》之十

太平洋海盆微结核研究

李扬 梁德华 郭世勤 孙文弘

地质出版社

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

本书是地质矿产部 86080 科研项目——太平洋中部多金属结核综合研究丛书之十。本书对微结核的外部形态特征、内部结构构造、主要矿物组成,微结核的化学成分及其横向和垂向变化特征、稀土元素地球化学行为,微结核的分布规律、富集层段,微结核含量与沉积物类型、沉积速率、沉积间断及地层时代的关系,微结核与多金属结核在矿物组成、化学成分方面的共性及差异等进行了全面系统地综合研究,对微结核的成因进行了初步探讨。

本书可供从事沉积学、矿床学研究的地质人员、科研工作者参考。

《太平洋中部多金属结核综合研究》之十

太平洋海盆微结核研究

李 扬 梁德华 郭世勤 孙文弘

责任编辑:牟相欣

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 5.875 铜版图: 2 页 字数: 131000

1993年11月北京第一版·1993年11月北京第一次印刷

印数: 1—400 册 定价: 4.70 元

ISBN 7-116-01317-2/T·1091

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° — 12° N， 176° E— 178° W(CP区)和 7° — 14° N， 138° — 152° 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中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样沉积物的类型、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， TiO_2 、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,敬请读者指正。

许东禹 金庆焕 梁德华

1991年10月

前 言

铁锰微结核（以下简称微结核）是一种黑色的、直径小于1 mm的铁锰质微粒。人们对微结核的研究程度远低于多金属结核。微结核，除其粒径细小外，其它特点与多金属结核有诸多相似之处。它们是在相近的海洋环境下形成的。多金属结核通常产于海底表面，而微结核则产于沉积柱和表层沉积物内。微结核分布于整个地史时期的沉积物中，研究其时间、空间分布规律，矿物及地球化学特征，可以追溯多金属结核的生长历史，为解决或探讨多金属结核的成因提供依据；对于指导找矿，特别是寻找富矿区具有一定的经济意义。

对微结核的研究主要始于70年代后期，G. P. Glasby (1973)、G. H. Friedlich (1976)、S. K. Addy (1977)等学者均作过一些专门研究。总的来看，国外学者研究的重点大都局限在微结核的形态、构造特征及化学成分的变化方面。所采用的研究手段有限，系统深入研究尚欠缺。

本书研究的样品是由地质矿产部海洋四号船分别采自中太平洋海盆（简称CP区）和东太平洋海盆（CC区）（图0-1）。CP区位于中太平洋海盆西北部，东临麦哲伦海岭，西濒马绍尔群岛，北界中太平洋海山群。CC区位于东太平洋海盆克拉里昂和克里帕顿两条断裂带之间。泛指的CC区东、西面分别以太平洋海隆和莱恩群岛山麓为界。

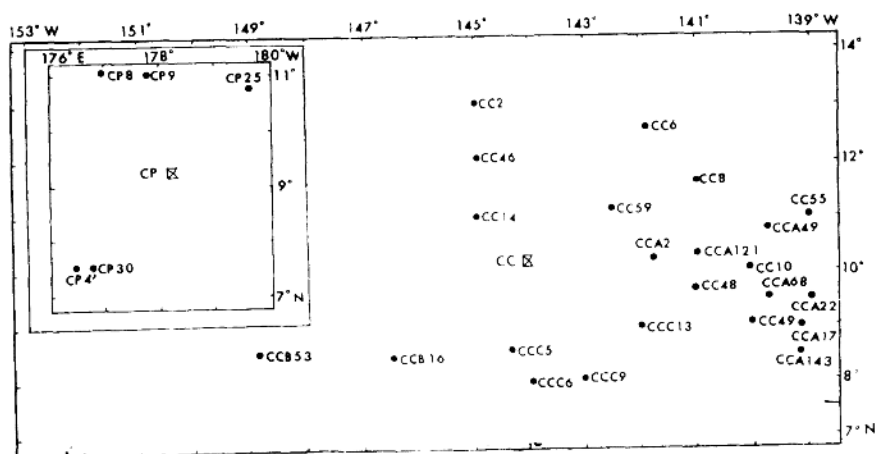


图 0-1 采样位置图

研究内容包括：沉积物的岩性特征、化学成分，微结核的外部形态特征、内部结构构造、分布特征，微结核的组成矿物及其化学成分、微结核的地球化学特征等。用R型聚类分析方法研究了微结核元素间的相互关系。此外，对微结核的成因、形成机制、生长模式、与多金属结核的成因关系及相互间的区别等进行了探讨。

本研究课题是由广州海洋局第二海洋地质调查大队及地质科学院矿床所共同承担完成

的。参加课题的人员除编者外，尚有杨明明、杨惠宁。样品测试分析由第二海洋地质调查大队实验室，地质科学院矿床所电子探针室、X射线衍射室、电镜室、红外光谱室，中国地质大学穆斯堡尔谱分析室完成。蔡乾忠、金庆焕、吴必豪等 9 位专家对本书进行了评审，作者根据专家们的宝贵意见作了修改，在此一并致谢。

目 录

前 言

第一章 沉积物特征及化学成分	1
第一节 表层沉积物	1
第二节 柱状样沉积物	3
第二章 微结核的形态、结构构造特征及分布	19
第一节 微结核的外部形态和表面特征	19
第二节 微结核的内部结构构造	20
第三节 微结核的分布特征	21
第三章 微结核矿物学和地球化学	35
第一节 矿物学	35
第二节 微结核地球化学	53
第四章 微结核成因初探	74
第一节 微结核形成环境	74
第二节 微结核的形成机制	75
第三节 微结核的成因分类	75
结 论	78
参考文献	81
英文摘要	83
图版说明及图版	85
对应图版 II、III 中矿物的 X 射线能谱图	90

第一章 沉积物特征及化学成分

第一节 表层沉积物

一、岩性特征

在研究区共取表层沉积样 21 个, 其中 CP 区 2 个、CC 区 19 个。各样品沉积物的类型和时代列于表 1-1。

表 1-1 表层沉积物的类型、时代及含砂量

样 号	时 代	沉 积 物 类 型	含 砂 量 (%)
CC6	第 四 纪	钙硅质软泥	3.0
CC49	?	钙硅质软泥	1.0
CP4'	第 四 纪	硅质软泥	3.6
CC2	第 四 纪	硅质软泥	1.2
CC8	?	硅质软泥	12.6
CC10	第 四 纪	硅质软泥	1.2
CC14	第 四 纪	硅质软泥	4.2
CC55	第 四 纪	硅质软泥	1.7
CCA2	第 四 纪	硅质软泥	6.4
CCA49	第 四 纪	硅质软泥	3.4
CCA143	第 四 纪	硅质软泥	1.1
CCC5	第 四 纪	硅质软泥	0.7
CP8	第 四 纪	硅质粘土	0.8
CC46	?	硅质粘土	2.0
CC59	?	硅质粘土	1.1
CCC6	第 四 纪	硅质粘土	2.8
CCC13	第 四 纪	硅质粘土	0.8
CCA22	第 四 纪	深海粘土	3.7
CCA68	第 四 纪	深海粘土	4.1

沉积物类型包括钙硅质软泥、硅质软泥、硅质粘土及深海粘土。据已有的微体古生物化石分析资料, 其沉积时代为第四纪。

各类型沉积物特征分述如下:

1. 钙硅质软泥

钙质生物(超微化石为主, 有孔虫少量)含量为 18%±, 硅质生物含量约为 75—80%, 粘土矿物为 1—6%, 碎屑矿物及岩屑偶见。据二个沉积样的微结核统计表明, 其含量丰富, 每克样中分别含有 1203 颗、2825 颗。

2. 硅质软泥

硅质生物含量为 35—89%, 钙质生物偶见, 粘土矿物含量为 10—49%, 长石、石英、辉石等碎屑矿物偶见。自生矿物为沸石、重晶石, 个别样品中可见磁铁宇宙尘。据 10 个样品的微结核含量统计, 每克样中含 44 颗—42397 颗, 平均含 6574 颗。

3. 硅质粘土

硅质生物含量为 5—30%, 钙质生物含量为 0—3%, 粘土矿物含量为 69—94%, 碎屑矿物偶见。微结核含量变化大, 每克样中含 32—31612 颗, 平均含 8297 颗。

4. 深海粘土

粘土矿物占绝对优势, 大于 95%。含少量的硅质生物及其他碎屑矿物, 宇宙尘偶见。微结核含量为每克中含 1791—5986 颗, 平均含 3888 颗。

二、化学成分

分析了三种类型沉积物的化学成分(表 1-2)。

表 1-2 表层样细碎屑(<63 μ m)沉积物的化学成分

元素含量 沉积物 类型 样号	元素	Mn (%)	Fe (%)	Co $\times 10^{-6}$	Ni $\times 10^{-6}$	Cu $\times 10^{-6}$	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
CC6	钙硅质软泥	0.395	4.260	80	140	380	6.904	49.37	10.95	0.09
CC49	钙硅质软泥	0.534	5.120	100	160	450	5.718	49.49	12.86	0.10
CC8	硅质软泥	1.046	4.882	130	500	720	1.537	57.68	13.42	0.21
CC46	硅质粘土	1.131	5.609	120	320	800	1.629	55.51	15.14	0.20
CC59	硅质粘土	1.046	5.407	160	400	790	1.422	56.72	14.80	0.19
*	深海粘土	0.48	4.83	118	237	370				0.099

*——太平洋深海粘土平均值。据 Hajime Hishida 等, 下同。

各种类型的化学成分与太平洋深海粘土的平均化学成分(主要金属元素)对比结果, 钙硅质软泥中的 Mn、Fe、Co 和 Ni 含量均小, 而硅质软泥和硅质粘土中上述元素的含量均大。据 Mn/Fe 值比较, 硅质软泥与硅质粘土较接近, 且比钙硅质软泥及太平洋深海粘土平均比值高。以上对比表明, 硅质软泥、硅质粘土中的成矿金属组分含量较高。

第二节 柱状样沉积物

一、岩性特征

5个柱状样沉积物的类型见图(1-1), 化学成分变化分别见图1-2—7。

柱状样所揭露的沉积物主要分为六种类型: 深海粘土、含沸石粘土、沸石粘土、硅质粘土、硅质软泥及钙质超微化石软泥。其特征分述如下:

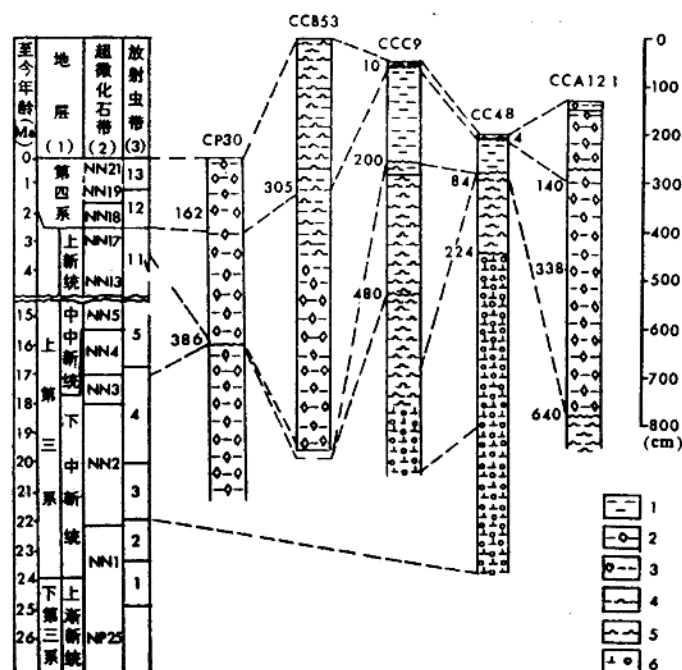


图 1-1 各类沉积物分布图

图中(1) B. U. Haq (1985); (2) E. Martini (1971); (3) Sanfillippo Wastourg and Reidel (1981, 1985)

1—深海粘土; 2—沸石粘土; 3—含沸石粘土; 4—硅质粘土; 5—硅质软泥; 6—钙质超微化石软泥

1. 钙质超微化石软泥

呈米黄色、褐黄色。沉积物组分以钙质超微化石为主, 硅质生物化石次之, 其总量大于95%。粘土矿物含量为1—4%, 碎屑矿物小于1%, 微结核含量小于1%。含砂量变化范围在0.5—12.3%。重要的钙质超微化石有 *Discoaster druggii*, *Triquetrorhabdulus carinatus*, *Sphenolithus conicus* 等, 放射虫有 *Theocyrtis annosa*, *Stichocory delmontensis*, 硅藻有 *Coscinodiscus oligocenicus*, *C. lewisianus* 等。

2. 硅质软泥

呈红褐色、褐色。沉积物组分中硅质生物含量为30—69%, 钙质生物小于2%, 粘土矿物含量为28—68%, 碎屑矿物含量小于1%, 自生矿物重晶石、沸石偶见, 微结核含量

为1—2%。含砂量为4.5—17.9%。沉积物中见有丰富的放射虫、硅藻化石及少量钙质超微化石。重要分子有放射虫: *Calocyrella costata*, *Stichocory wolffii*, *Dicadospyris dentata*; 硅藻: *Coscinodiscus oligocenicus*; 钙质超微化石: *Triquetrorhabdulus carinatus*, *Discoaster druggii*。

3. 硅质粘土

呈红褐色、褐色, 沉积物组分以粘土矿物为主(含量为68—93%), 次为硅质生物(含量为5—30%)、钙质生物及鱼牙、鱼骨(含量均为1—2%)。碎屑矿物少见(小于1%), 以火山碎屑如长石、辉石和火山玻璃为主。自生矿物重晶石和沸石常见。微结核含量为1—2%。这一沉积物类型的分布时代范围较广, 在CP区见于CP 9柱状样的0—110 cm; 据化石年代资料, 时代为早中新世中期, 见超微化石 *Triquetrorhabdulus carinatus*, *Discoaster druggii*, *Discoaster deflandrei*, *Coccolithus pelagicus* 等。

4. 沸石粘土

呈褐黄色、黄褐色。沉积物组分中以粘土矿物为主, 含量为63—87%, 自生沸石含量为10—30%, 微结核含量小于1%, 碎屑矿物含量小于1%, 生物化石含量小于5%。其中在CP 30柱状样的380 cm以上、CCA 121柱状样338 cm以上有重要的放射虫化石: *Didymocorylis tetrathalamus*, *Spongaster tetras*, *Pterocanium praetextum* 及硅藻化石 *Thalassiosira oestrupii* 等, 而CP 25柱状样沸石粘土中则含有较多的钙质超微化石 *Triquetrorhabdulus carinatus*, *Discoaster druggii* 等。据微体化石、古地磁资料, 含这一沉积物类型的CP 25柱状样的0—140 cm的沉积时代为早中新世。

5. 含沸石粘土

呈褐黄色。沉积物组分中以粘土矿物占绝对优势(含量为86—89%), 沸石含量为5—10%, 微结核含量小于1—2%, 碎屑矿物少见。生物含量小于5%, 以硅质生物为主, 鱼牙、鱼骨次之。

6. 深海粘土

呈褐色、红褐色。沉积物组分中粘土矿物含量为96—98%, 自生矿物、碎屑矿物及生物组分仅占2—4%。沉积物中含砂量变化范围在0.1—1.5%。生物以放射虫、硅藻为主。可见放射虫化石 *Didymocorylis tetrathalamus*。

二、化学成分

为了解柱状样沉积物中某些元素的浓度与微结核含量、微结核化学成分含量变化之间的关系, 对细碎屑(<63 μm)沉积物进行了化学成分(包括Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ca、 SiO_2 及 Al_2O_3)测定。由于样品的数量有限及考虑到沉积物全岩样的化学成分中金属元素Mn、Fe、Co、Ni、Cu受到沉积物中微结核含量的影响这一因素, 只对分离过的每个样品中小于63 μm 的细碎屑沉积物进行了化学分析。

现将各沉积柱的化学成分论述如下:

1. CP 30

沉积物的化学分析结果见表1-3, 其含量变化曲线见图1-2。

整个柱状样中的Mn、Fe和Cu含量及Mn/Fe值均大于太平洋深海粘土中相应元素的平均含量及比值, 而Co和Ni含量接近太平洋深海粘土中Co、Ni的平均含量。这些元素含量高的原因, 不能认为是异常, 因为样品不是全样, 只是细碎屑部分。据Halbach

表 1-3 CP 30 柱状样细碎屑 (<63 μ m) 沉积物的化学成分

元素 含量 深度(cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-6}$)	Ni ($\times 10^{-6}$)	Cu ($\times 10^{-6}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
0—20	0.805	4.96	110	250	650	1.65	55.20	14.39	0.16
40	0.790	5.02	110	230	590	1.61	55.44	14.44	0.16
60	0.782	5.11	110	910	510	1.65	55.11	14.27	0.15
80	0.782	4.82	100	230	630	1.55	55.89	14.07	0.16
100									
120	0.813	4.73	110	240	580	1.67	55.34	14.30	0.17
140									
160	0.79	5.25	110	220	610	1.62	54.88	14.36	0.15
180	0.81	5.20	110	220	590	1.61	55.32	14.61	0.16
200	0.84	5.18	110	250	690	1.64	55.70	14.68	0.16
220	0.79	4.97	110	220	630	1.61	55.12	14.61	0.16
240	0.81	4.95	110	240	620	1.74	55.28	14.73	0.16
260	0.81	4.99	110	230	590	1.60	56.20	14.44	0.16
280	0.81	5.04	100	230	590	1.64	55.78	14.64	0.16
310	0.84	5.30	110	240	630	1.58	55.77	14.54	0.16
330	0.81	5.02	110	220	630	1.95	55.94	14.18	0.16
350	0.82	5.16	100	230	750	1.64	53.26	14.25	0.16
370	0.84	5.16	110	240	690	1.62	55.69	14.74	0.16
385	0.84	5.08	100	240	610	1.60	55.59	14.51	0.17
410	0.80	4.98	110	230	630	1.69	55.71	14.51	0.16
430	0.80	5.03	100	220	590	1.55	56.03	14.51	0.16
450	0.83	5.25	110	220	610	1.52	55.49	14.61	0.16
470	0.82	5.13	110	490	630	1.62	55.73	14.46	0.16
485	0.83	5.01	110	230	690	1.75	56.18	14.10	0.17
500	0.84	5.06	110	230	690	1.65	55.41	15.14	0.17
520	0.81	5.00	110	230	590	1.59	55.75	14.66	0.16
540	0.82	5.01	100	220	620	1.64	66.99	14.90	0.16
560	0.83	5.04	110	220	650	1.90	55.29	14.85	0.16
580	0.85	5.23	110	230	620	1.51	55.57	14.96	0.16
600	0.78	5.02	100	210	580	1.45	55.51	14.22	0.16
620	0.82	5.16	100	220	610	1.48	55.72	14.93	0.16
635	0.82	5.23	110	220	600	1.53	56.20	14.76	0.16

续表

元素 含量 深度(cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-5}$)	Ni ($\times 10^{-5}$)	Cu ($\times 10^{-5}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
655	0.82	5.21	110	230	690	1.50	57.28	14.08	0.16
675	0.82	5.33	110	230	630	1.54	55.66	14.99	0.15
680	0.81	5.13	110	210	620	1.54	55.92	14.76	0.16
深海粘土*	0.48	4.83	118	237	370				0.099

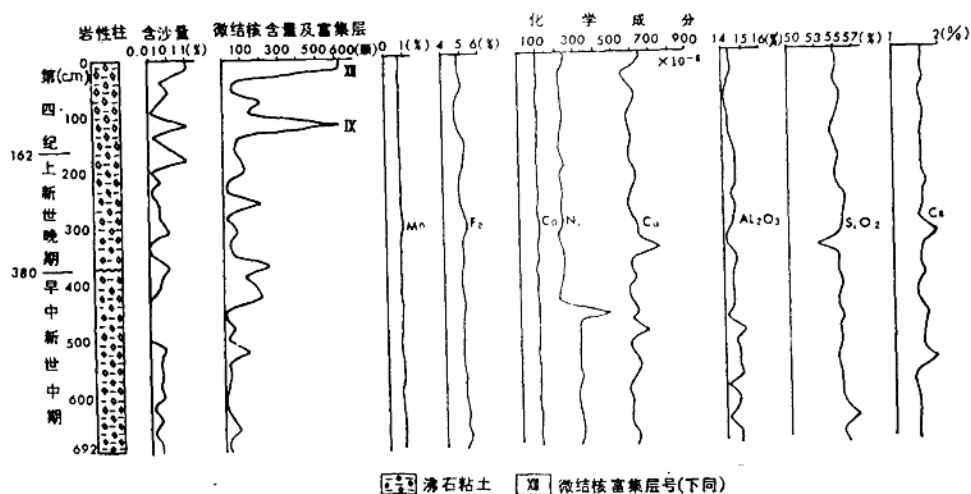


图 1-2 CP 30 柱状样沉积物含砂量、微结核含量及化学成分变化曲线图

(1979) 等人的看法, 这些细碎屑物中金属元素含量最大。整个柱状样沉积物中的 Mn 含量非常接近, 变化范围小于 0.07%; Fe 含量变化于 4.73—5.33% 之间; Co 和 Ni 含量变化不大。

2. CP 9

沉积物中主要元素及氧化物含量见表 1-4, 含量变化曲线见图 1-3。

化学成分中除元素 Ni 外, Mn、Fe、Cu 和 Co 的含量及 Mn/Fe 值均大于太平洋深海粘土中相应元素的平均含量及比值。

从上往下, Mn、Co 和 Ni 含量稳定, 而 Fe 含量稍有增加; Ca 含量变化幅度相对较大, 主要受沉积物中钙质生物含量影响。尽管柱状样中微结核含量自上而下明显减少, 但沉积物中主要金属元素含量变化不大, 说明微结核的形成与底层水的化学性质及其行为更密切, 与沉积物中的金属元素含量关系不大。

3. CP 25

主要化学成分含量及其变化曲线分别见表 1-5 和图 1-3。沉积物中的 Mn、Fe、Co、Ni 和 Cu 元素含量及 Mn/Fe 值均大于太平洋深海粘土中上述各元素的平均含量及 Mn/Fe 值。Mn、Co、Ni 和 Cu 含量自上而下有增加的趋势。在 75 cm 处, Ni、Cu 含量显著增

表 1-4 CP9柱状样细碎屑(<63 μm)沉积物的化学成分

元素 含量 深度(cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-6}$)	Ni ($\times 10^{-6}$)	Cu ($\times 10^{-6}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
0—20	0.64	6.06	120	180	580	1.15	55.23	16.90	0.10
40	0.65	5.89	120	180	570	1.19	54.92	16.81	0.11
60	0.64	6.09	130	180	540	1.12	54.33	15.47	0.11
80	0.66	6.18	120	620	560	1.29	53.04	15.71	0.11
110	0.69	6.27	120	170	540	0.99	51.73	15.92	0.11
深海粘土*	0.48	4.83	118	237	370				0.099

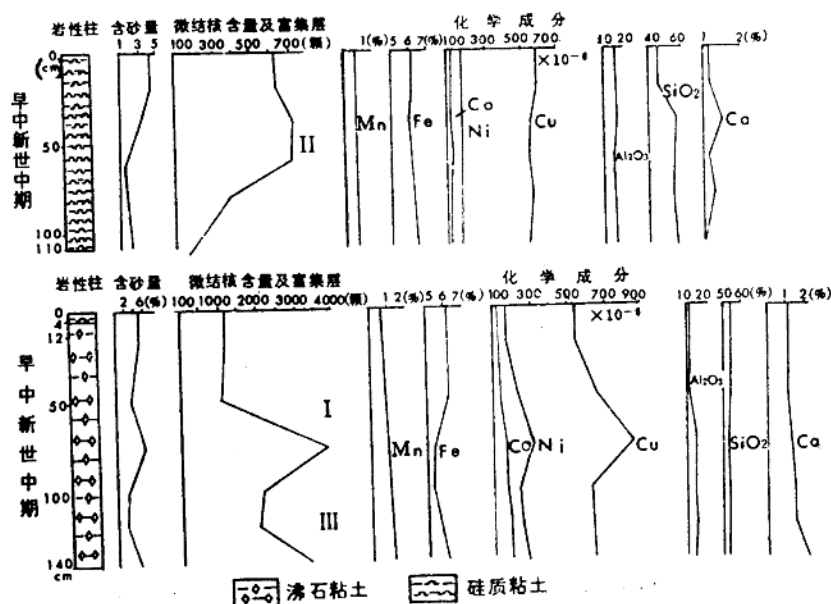


图 1-3 CP9(上)、CP25(下)柱状样沉积物含砂量、微结核含量及化学成分含量变化曲线图

表 1-5 CP25柱状样细碎屑(<63 μm)沉积物的化学成分

元素 含量 深度(cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-6}$)	Ni ($\times 10^{-6}$)	Cu ($\times 10^{-6}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
0—20	0.69	6.13	130	180	590	1.19	53.76	15.71	0.11
50	0.77	6.15	140	240	660	1.12	54.40	15.92	0.12
75	0.88	5.45	170	320	830	1.39	53.79	15.99	0.16
100	0.94	5.28	170	240	620	1.44	53.45	15.28	0.18
120	1.05	5.70	190	250	630	1.54	52.98	15.55	0.18
140	1.06	6.02	190	280	630	2.21	52.84	15.06	0.18
深海粘土*	0.48	4.83	118	237	370				0.099

表 1-6 CCB 53 柱状样细碎屑(<63 μm) 沉积物的化学成分

含 量 深度(cm)	元 素 Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-6}$)	Ni ($\times 10^{-6}$)	Cu ($\times 10^{-6}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
0—15	0.21	5.04	70	120	550	0.91	58.78	14.04	0.04
30	0.13	4.89	50	120	590	0.93	57.94	14.32	0.02
45	0.47	5.32	170	200	670	0.85	56.49	14.71	0.09
60	0.28	5.25	130	140	700	0.87	56.93	14.49	0.05
75	0.57	5.29	130	270	630	0.89	56.38	14.93	0.10
90	0.94	5.32	130	270	650	0.84	55.96	14.90	0.17
105	0.60	5.36	110	190	600	0.91	56.04	15.21	0.11
120	0.74	5.39	120	230	620	0.89	55.72	15.21	0.14
135	0.68	5.44	110	220	1220	0.96	55.57	15.21	0.12
150	0.70	5.34	130	220	910	0.96	55.59	15.10	0.13
165	0.67	5.58	130	230	850	0.98	55.44	15.09	0.12
180	0.67	5.54	130	230	800	0.99	55.33	15.38	0.12
195	0.38	5.39	130	170	790	0.98	55.73	15.66	0.07
210	0.45	5.54	130	180	780	0.99	55.17	15.21	0.08
225	0.49	5.34	130	150	840	0.97	55.23	15.21	0.09
240	0.66	5.77	150	250	840	1.08	55.46	15.26	0.11
255	1.23	5.65	160	420	840	1.01	55.05	15.43	0.21
270	1.11	5.47	160	370	850	1.11	54.56	15.54	0.20
285	0.95	5.47	150	350	860	1.14	54.38	15.10	0.17
300	0.83	5.43	150	330	840	1.04	55.50	14.93	0.15
315	0.70	5.29	150	360	820	0.97	55.48	14.82	0.13
330	0.34	5.43	130	210	800	0.91	56.10	14.99	0.06
345	0.31	5.27	160	220	810	0.98	56.02	14.84	0.06
360	0.32	5.29	170	220	860	0.94	56.03	14.65	0.06
375	0.30	5.18	150	220	820	1.08	56.82	14.67	0.05
390	0.40	5.20	180	230	850	0.94	56.19	14.93	0.07
405	0.52	5.27	160	260	890	1.18	55.78	15.02	0.10
420	0.63	5.20	180	270	880	1.19	55.95	15.10	0.12
435	1.34	5.36	190	430	1110	1.29	54.77	14.60	0.25
450	1.54	5.38	170	440	1010	1.31	53.95	14.82	0.28
465	1.42	5.25	170	470	1050	1.40	54.79	14.82	0.27
480	1.58	5.34	200	610	1120	1.37	53.31	14.82	0.29

续表

元素 含量 深度(cm)	Mn (%)	Fe (%)	Co ($\times 10^{-6}$)	Ni ($\times 10^{-6}$)	Cu ($\times 10^{-6}$)	Ca (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn/Fe
495	1.44	5.46	230	580	1060	1.51	54.26	14.71	0.26
510	1.44	5.36	230	580	1010	1.40	53.97	14.88	0.27
525	1.46	5.39	200	610	1010	1.37	53.95	14.60	0.27
540	1.54	5.28	200	610	1010	1.37	54.00	14.61	0.29
555	1.64	5.39	230	590	1090	1.43	53.55	14.60	0.30
570	1.59	5.40	230	570	1100	1.45	53.33	14.43	0.29
585	1.48	5.25	220	530	1090	1.43	54.28	14.38	0.28
600	1.57	5.18	230	560	1080	1.50	53.89	14.32	0.30
615	1.45	5.38	220	520	1050	1.43	54.29	14.27	0.27
630	1.55	5.04	230	520	1050	1.49	54.78	14.54	0.31
645	1.46	5.06	200	500	1000	1.53	54.62	14.27	0.29
660	1.36	5.14	190	490	1040	1.54	55.16	14.32	0.26
675	1.24	5.00	190	450	990	1.50	55.56	14.61	0.25
690	1.21	5.02	190	470	990	1.47	55.80	14.65	0.24
705	1.19	4.88	190	410	1030	1.48	55.99	14.35	0.24
720	1.07	4.92	170	390	960	1.66	55.46	14.43	0.22
735	1.10	4.78	170	410	940	1.48	56.25	14.49	0.23
750	1.07	4.88	160	380	960	1.47	56.46	14.49	0.22
765	1.09	4.71	170	410	950	1.32	56.29	14.54	0.23
780	1.08	4.60	170	410	1050	1.33	58.88	14.49	0.23
795	1.08	4.83	160	400	1010	1.46	55.88	14.43	0.22
810	1.04	4.73	170	400	1050	1.39	55.88	14.54	0.22
825	1.06	4.68	170	410	990	1.80	56.25	14.16	0.22
840	1.08	4.92	180	390	1090	1.72	56.01	14.27	0.22
深海粘土*	0.48	4.83	118	237	370				0.099

大，并与微结核高丰度值对应。说明该沉积期底层水中 Ni 和 Cu 的浓度较大，它们不但进入微结核中，而且同时进入沉积物中。

4. CCB 53

主要化学成分含量及变化曲线分别见表 1-6 和图 1-4。

第四纪与上新世沉积物中金属元素 Mn、Co、Ni 和 Cu 含量及 Mn/Fe 值存在明显差异。第四纪沉积物中上述元素的含量明显地比上新世低，尤其是上部硅质软泥中，除 Cu 和 Fe 外，其它元素含量均低于太平洋深海粘土中相应元素的含量。