

《太平洋中部多金属结核综合研究》之七



太平洋中部水-岩系统中 微生物活动及其成矿作用

阎葆瑞 等著

地质出版社

6.3

中国科学院地质研究所地质研究所



太平洋中部水 岩系统中心 物活及其成因作用

——中国科学院地质研究所——

——中国科学院地质研究所——

《太平洋中部多金属结核综合研究》之七

太平洋中部水-岩系统中 微生物活动及其成矿作用

阎葆瑞 张 胜 张锡根 胡大春 著

地 质 出 版 社

(京)新登字085号

内 容 简 介

本书是《太平洋中部多金属结核综合研究》丛书中的一个分册。作者从微生物地球化学角度,以洋底水-岩-微生物相互作用作为一个完整的系统,对洋底多金属结核的微生物成矿作用进行了研究。

本书首次定量评价了洋底各介质中微生物生化反应强度以及计算对比了成矿物质的微生物的生物化学转移率及非生物的化学转移率;揭示了成矿物质由微生物活动引起的反应速度和演变方向,进而论证了洋底多金属结核的成矿机制和成矿模式;提出了多金属结核微生物成矿的多阶段性及微生物成矿理论。本书在理论上既拓宽了当前水-岩作用研究范围,又开辟了微生物地球化学研究的新领域,同时为矿床成因提供了新的研究途径和思路,为我国探寻深海洋底矿产资源和选定成矿远景区提供了新的生物学上的依据。

本书可供从事海洋科学、地球化学、地质微生物、水文地质、地质矿产等专业的人员及有关大专院校、科研部门科技人员参考。

《太平洋中部多金属结核综合研究》之七

太平洋中部水-岩系统中 微生物活动及其成矿作用

阎葆瑞 张 胜 张锡根 胡大春 著

责任编辑:杨珊珊

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: 6.75 铜版图: 2 页 字数: 149000

1994年2月北京第一版·1994年2月北京第一次印刷

印数: 1—800 册 定价: 5.25 元

ISBN 7-116-01475-6/P·1203

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物资源的重要性，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，谨请读者指正。

许东禹 金庆焕 梁德华

前 言

自1872年英国海洋考察船“挑战者号”首次发现大洋锰结核以来，它就象磁铁一样吸引了越来越多的科学家的关注，并且引起了他们在这个领域内进行了许多虽然尚不系统，但意义不凡的开拓性研究。

世界各国对洋底锰结核的大规模调查始于本世纪60年代，美国、前苏联、法国和日本等国竞相涉足此研究领域，并进行了大量的研究活动。我国对深海锰结核的研究起步较晚，直至80年代初才开展大洋地质调查研究。

太平洋洋底蕴藏着富含Fe、Mn、Ni、Co、Cu、Pb、Zn等元素的多金属结核（壳）。各国进行过多航次的大洋地质调查，取得了许多宝贵的资料和成果。对锰结核的形成问题，提出了许多观点，但大多从物理、化学作用方面进行分析。近年来，生物成矿作用问题已引起许多国家的注意，但对洋底微生物活动与多金属成矿元素的富集和成矿关系等理论与实际问题的研究却十分薄弱，几乎处于空白状态，有关文献资料寥若晨星。

洋底多金属结核成矿元素迁移富集的微生物地球化学作用是涉及众多学科的一个重要命题。而洋底多金属结核成矿元素在微生物参与下的运移规律，以及与沉积物之间的相互作用和结核形成中的微生物成矿作用的研究又是地学的前沿学科之一。因此，对于它的研究，目前已引起国内外的关注。

从1986年起，我们在赤道北太平洋中部CP区中太平洋海盆及CC区东太平洋海盆两个地区开展了洋底微生物活动与多金属成矿元素转移的关系及微生物成矿作用等地球化学的研究。研究过程中进行了大洋实地考察和室内模拟实验，取得了丰富的地质、地球化学、微生物等实际资料。这本专著就是在对这些实际资料综合分析的基础上，并参阅前人的有关文献而写成的。它论述了太平洋各介质微生物的分布与活动强度及其与多金属结核成矿元素转移的关系；结合洋底水-岩-微生物系统中成矿元素的聚集、沉淀的微生物作用和纯化学作用模拟实验的对比，探讨了洋底系统中成矿组分在水-沉积物界面-固相间的相互转化（沉淀-溶解-再沉淀）的方向、速度和演化规律，进而提出了洋底多金属结核生成的微生物作用及成矿阶段、模式以及成矿机制等等。我们认为这些问题的深入研究和探索，以及目前所取得的成果不仅在理论上拓宽了当前成矿作用和水-岩作用研究的范围，而且又开辟了大洋微生物地球化学研究的领域，同时对洋底某些成矿元素的形成、富集及矿床的成因等也提供了新的研究途径和思路。这对探寻洋底矿产资源和确立成矿远景区也有实用价值。

本书共分七章：第一章导论，简述了研究思路、国内外研究概况、研究方法等问题；第二章简述了研究区的地质环境概况。该部分为探讨洋底成矿组分的迁移聚集作用以及微生物发生及其生态演替提供了背景资料。第三章论述了大洋地球化学环境，讨论和对比了海水、孔隙水、沉积物的地球化学环境参数，以及从大洋各层水中氢氧同位素组成特征等方面探讨了洋底地球化学环境；第四章论述了大洋水中铁锰的分布和转化的影响因素；第五章讨论了铁细菌、硫酸盐还原菌、排硫杆菌及脱氮硫杆菌对Fe、Mn等成矿组分迁移沉

淀的作用机理。这是本书的基础理论部分,为后两章的论述奠定了基础;第六章通过洋底水-岩-微生物系统中铁细菌、硫酸盐还原菌对成矿组分及非生物因素对成矿组分转化模拟实验资料的对比研究,对多金属结核成矿组分在系统中的集散关系作出了判断,为讨论成矿物质沉淀作用或还原作用可能产生的物质再分配提出了理论依据。

第七章论证了洋底微生物活动与多金属结核生成的关系,概括出微生物成矿模式及成矿理论。

本书最后提出的几点结论,旨在阐明太平洋洋底水-岩-微生物系统中成矿元素转移的规律和多金属结核微生物成矿的总特点。

虽然深海多金属结核成矿作用是地学中的重大课题,并进行了很多研究。但微生物成矿作用却极少为人涉及。A. E. Kpucc及C. E. Zobell先后研究过海洋微生物学,但都缺少从生态学角度和从成矿作用方面去探讨海洋中微生物活动产生的氧化还原过程和与多金属结核生成的关系这些方面的研究资料。因此,本书着重探讨微生物生态及其与多金属结核形成的关系,并非单纯讨论纯海洋微生物学或微生物分类学及各个菌体的生理特征,而是有针对性地将微生物活动与成矿过程联系起来,进而探索多金属结核的形成过程和形成机制。

在研究过程中,阎葆瑞承担了成果的总设计并主持完成了课题研究;张胜承担了大洋现场取样、测试及现场微生物试验;胡大春完成了书中各类参数的计算和理论解释;张锡根完成了同位素研究;各类模拟试验由阎葆瑞、张胜、胡大春等完成;成矿组分的测试方法及样品的测试工作由徐淑芬完成。

本书由阎葆瑞负责统编和定稿,并撰写了前言、第一、五、六、七章和结论,第二章由张胜撰写,第三、四章由张锡根撰写。

本书主要是根据1986—1990年进行的太平洋中部微生物活动与多金属结核生成的关系的研究成果撰写而成的。值得说明的是,本项研究工作虽起步较迟,研究时间较短,但“千里之行,始于足下”,总算迈出了艰难的一步,但愿它能对今后这个研究领域的发展有所裨益。

本项研究涉及面广,难度大,探索性强,工作中所以能取得一些成绩与许多专家和同事们的鼎力相助是分不开的。地矿部水文地质工程地质研究所名誉所长、学部委员张宗祜先生在70年代就意识到这一研究领域的重要意义,对我们的研究给予了极大的支持和鼓励。前任所长任福弘研究员及王东升副研究员,地矿部水勘院总工程师段永侯教授,环境地质所所长哈承佑研究员,地矿部广州海洋地质调查局总工程师金庆焕、副总工程师梁德华,地矿部海洋地质研究所副所长许东禹及张明书副研究员,等均对本项研究给予了支持和帮助,在此作者向他们表示衷心的感谢。海洋四号船全体考察工作人员提供了各类样品和现场测试数据,对研究工作提供了有利条件;在计算机制图中我所张凤斌工程师给予了帮助和指导,其他有关处、室也给予了大力支持,在此一并向他们表示衷心的感谢。

在1990年我国自然科学基金委员会主持召开的生物成矿研讨会上,许多同志与作者进行了有益的讨论。在微生物基础理论及涉及到微生物生态等研究方面,曾得到了中科院微生物研究所王大珍研究员的指导与支持,作者也深致谢意。

作者对在本项研究完成过程中地矿部石油海洋局、地矿部广州海洋地质调查局、地矿部海洋地质研究所以及86080项目协调办公室所给予的信任和支持致以崇高的敬意。

由于这是一项多学科的综合研究成果,也是一项全新的工作,不妥和疏忽之处在所难免,敬希批评指正。

目 录

前言	
第一章 导论	1
第一节 研究思路和特色	1
第二节 研究方法	2
第三节 国内外研究概况	3
第四节 几个术语的解释	5
第二章 研究区地质环境概况	7
第一节 研究区地理位置与地质背景	7
第二节 洋流与水团	12
第三节 研究区多金属结核的物理化学特性及富集概况	13
第三章 洋底水-岩-微生物系统中的地球化学环境	17
第一节 大洋水地球化学特征	17
第二节 底层水地球化学特征	20
第三节 孔隙水地球化学特征	22
第四节 沉积物地球化学特征	24
第五节 海水的氢氧同位素组成特征及其与海洋环境的关系	26
第四章 洋底水-岩-微生物系统中铁、锰等金属元素的转移及其影响因素	29
第一节 铁、锰在太平洋各层水中的分布特征	29
第二节 影响大洋水中铁、锰等元素迁移性的因素	34
第五章 微生物对铁、锰等成矿组分转化的作用机理	39
第一节 微生物对铁、锰的氧化与还原	39
第二节 微生物对铁、锰的转化机理实验研究	42
第三节 铁细菌对多金属结核成矿组分沉淀作用的实验研究	48
第六章 洋底水-岩-微生物系统中成矿组分转移的模拟实验研究	57
第一节 模拟实验的意义和设计原则	57
第二节 洋底水-岩-微生物系统中铁细菌对成矿元素沉淀作用的模拟实验	59
第三节 洋底水-岩-微生物系统中硫酸盐还原菌对成矿元素转移作用的模拟实验	66
第七章 洋底多金属结核形成的微生物作用	71
第一节 洋底多金属结核的物质来源及成矿元素的沉淀机制	71
第二节 洋底水-岩-微生物系统中微生物活动强度及其成矿作用	77
第三节 微生物生态系统在海洋环境中的演替	85
第四节 洋底多金属结核微生物的成矿模式	87
结论	90

参考文献.....92

英文摘要.....94

图版说明及图版.....99

第一章 导 论

就世界而言,大洋锰结核的调查研究至80年代已进入了一个蓬勃发展的时期,并开展了多学科的研究。但对结核形成和生长机制等,以往的研究多局限于地质、物理化学方面。锰结核的形成是一个复杂的过程,其形成不是溶解于海水中的铁锰发生化学沉淀的结果,而是在其它作用(包括生物化学作用)参与下的一个较为复杂的过程。正如我国地质学界老前辈、学部委员叶连俊先生指出的“生物作用、物理作用和化学作用是成矿的三大根本要素”,所以,当今已将生物成矿作用的研究提到应有的高度。本书主要从微生物地球化学角度,探索多金属结核微生物成矿作用。在评价微生物活动方法上,我们不仅采用传统的细菌计数法,而且应用洋底各介质中微生物生化反应强度指标及成矿元素的微生物及化学转移率计算对比的方法,定量评价出元素转移的强度及其与多金属结核形成的关系。在叙述正文之前有必要谈谈本书对多金属结核微生物成矿的研究思路、研究方法及研究概况,并对一些术语做必要的解释。

第一节 研究思路和特色

多金属结核的发现和研究已有百余年的历史。前人已做过大量的研究,并取得了多方面的成果。但是,到目前为止,无论是对多金属结核成矿物质的迁移转化,还是对多金属结核的形成机制等问题,还存在着各种各样的认识和观点。近年来,锰结核的生物形成机制的研究已受到各国有关科学家的重视。其中细菌成矿机制方面也有一些文献报导,但很零星,并缺乏系统研究。为了查明微生物活动与多金属结核成矿的关系及其成矿作用,我们在研究中既注意前人的成果,又注意在前人的基础上做到有所发展、有所前进,以期对多金属结核的研究有所贡献。

大洋是一个复杂的多组分和多相系统。其中含无机物、有机物和微生物。各种元素的迁移转化不但受无机物和有机物形式迁移的影响,而且也受微生物代谢所产生的生物化学作用的影响。有些组分常以复杂的络合物形式迁移,从而增大了它们在水中的浓度。洋底多金属结核的形成正是在这一系统中经历了一系列氧化—还原反应及生物化学反应、元素的无机物和有机物迁移转化的过程。在对这个过程的研究中,同时开辟了生物成矿这一前沿研究领域。探索结核的成因,至少涉及到成矿物质的来源,水-岩界面上和沉积层内元素的转化、聚集以及结核的沉积和生长机理诸问题。据测试,结核的主要成矿元素Fe、Mn、Ni、Co、Cu、Pb、Zn等在大洋中各处的浓度都很低,远未达到各元素沉析的饱和和浓度值,甚至不可能以其浓度差作为讨论多金属结核形成的直接证据。然而,就是在这样成矿金属低浓度的洋底水与沉积物界面处,却形成了巨量的多金属结核。因此,对其形成机制就不可能从单纯的化学作用中求得答案。据研究,成矿元素的迁出方式与大洋中生物活动的关系极为密切(W. S. Broecker, 1974)。微生物可参与许多元素的氧化还原过程,氧化铁和锰的微生物可以促使Fe及Mn氧化,生成难溶的高价铁和锰的氧化物。我们在结核

表面培养出了一些氧化铁和锰的微生物，它们在培养介质中的代谢活动确实加速了铁和锰的氧化（与初始浓度相比，沉淀铁和锰的数量达80%以上），研究结果将在第五、六章专述。因此，我们认为对微生物在洋底的活动与多金属结核生成关系的研究，有助于揭示洋底固液界面成矿组分的沉析和再分配的规律。显然，通过洋底环境中化学、胶体化学和生物化学综合研究就能对结核的成因得到较全面地解释。

海洋中许多组分，特别是宏量组分浓度基本是恒定的，微量组分因受物理、化学及生物化学等因素的干扰，其浓度具有某种差异。微生物在海水中分布非常广泛，海洋中的物质又总是处于由无机态转化为有机态，再由有机态转化为无机态的不断循环中，在物质循环转化中微生物起着非常重要的作用。大洋中成矿金属组分的循环是因为大洋表层水体中生长有能进行光合作用的浮游植物及藻类，它们可从表层水中吸收某些元素，而这些生物又可被动物和微生物消耗之后再返回大洋溶液中组成海水组分，只要它们仍处于溶解状态，重力就对它们不起作用，但其中的固相颗粒物质却可以在重力作用下向深海底层聚集。这样，生命循环就导致了大洋中某些物质的转化分离。显然，大洋中微生物的活动能够影响成矿金属元素的转化和富集。因此，我们以水-岩-微生物相互作用作为一个完整的系统进行洋底多金属结核成矿作用的研究。通过大洋实地考察、洋底沉积物、底层水、孔隙水的微生物活动和室内微生物对成矿元素转移聚集作用等模拟实验研究，揭示出成矿组分由微生物引起的反应规模和演变方向，进而论证了洋底多金属结核的微生物成矿作用。

多金属结核微生物成矿作用研究涉及的领域较广。本书在研究思路上主要以洋底水-岩-微生物系统中微生物地球化学作用为主干，并注意吸取相邻学科的研究成果，注意纳入了矿物学、地球化学、同位素地球化学、沉积地球化学和水文地球化学等学科的研究方法和成果，将海上调查及现场实验资料和室内基础研究成果进行综合分析，使研究水平上升到更高层次。

第二节 研究方法

一、样品的采集方法

有缆采样：用大洋50型表层采样器（抓斗）采集沉积物样；用单铲箱式及大型重力活塞式采样器采集沉积物及水样；用拖网采集结核样。用SAMK-3温盐深取样器获取现场测试温度、盐度、电导率、pH值、溶解氧、微生物等大洋水样品和声波速度等资料。

无缆地质采样：包括自返抓斗采集结核样和自返重力采样器采集沉积物和底层水（采样器见图版I、II）。

二、现场及室内微生物的培养鉴定及活动强度的确定

在实验过程中定时观测各类微生物在培养介质中的反应现象，并定量测定各种菌代谢作用产生的生化反应产物的数量，用这些生化反应产物的数量作为定量评价微生物活动强度的指标。评价微生物活动强度的具体方法和指标如下：

1. 铁细菌 (*Iron bacteria*)

测定培养基液中该菌作用所沉淀的Fe的数量 (mg/L)，计算出其相对于初始浓度的Fe的沉淀百分含量 (%)；

2. 硫酸盐还原菌 (*Desulfovibrio*)

测定由该菌脱硫酸作用生成的 H_2S (mg/L) 的数量;

3. 排硫杆菌 (*Thiobacillus thioparus*)

测定由该菌作用氧化的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的数量 (mg/L), 计算其相对于初始浓度的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 被氧化的百分含量 (%);

4. 脱氮硫杆菌 (*Th. denitrificans*)

测定由该菌作用还原硝酸盐产生的 NO_2 的 (mg/L)数量;

5. 氧化铁硫杆菌 (*Th. ferrooxidans*)

测定由该菌氧化作用产生的 Fe^{3+} (mg/L) 的数量;

6. 氧化铁杆菌 (*Ferrooxidans*)

测定由该菌作用生成的 Fe^{3+} (mg/L)的数量。

进行的其它实验研究如:

1. 通过微生物最佳培养基选择条件的试验研究, 确定各类微生物的适宜性培养基;
2. 微生物对大洋中Fe、Mn、Cu、Ni、Co、Pb、Zn转化的模拟实验研究。
3. 水-岩-微生物系统中成矿组分转移的微生物作用模拟实验研究。

三、测试数据的处理

HY4-861及HY4-871两个航次和HY4-881航次采集的水样的处理方法有所不同。前两个航次的水样未经过滤便进行了硝酸酸化处理, 这样底层水样中的悬浮物及颗粒物质(包括底层水中原有的颗粒物质及沉积物的细颗粒物质)的金属组分也溶解于水中, 导致水样中金属含量不等量地增高(由 $n-n \times 10^5$ 不等), 不可能以系统误差予以校正。因此, 这种水样的分析数据不能代表底层水中金属的实际浓度, 故在分析整理底层水的资料时未选用前两个航次酸化水样的测试数据。而HY4-881航次所采集的水样是事先经过过滤后酸化的, 这就避免了由于沉积物表层颗粒中金属元素的溶解而造成的误差, 测试数据反映了水中金属的实际浓度。因此在选用底层水的资料时, 我们选用了HY4-881航次所采集的水样的分析结果。

第三节 国内外研究概况

深海锰结核被认为是一种最有经济价值的海底矿产资源。在研究海底锰结核方面, 有关生物学、地质学、大洋学等事件的对比问题, 引起了许多国家研究者的重视, 并进行了许多研究。

由于地球科学及其相邻学科的发展, 矿床成矿理论得到了较大发展, 摒弃了单一的成矿理论, 提出了多源、多阶段、多因素的成矿理论。对成矿机理的研究已发展到成矿作用地球化学过程的物质转化的研究, 并将实地考察与室内模拟相结合, 探讨成矿物质演化及其成矿环境, 从而建立综合性的成矿机理和成矿模式。生物成矿就是其中的一个新的且重要的方面。

许多研究资料表明, 海洋微生物是海底沉积作用和成矿作用的主要参与者和作用者(薛廷跃, 1962)。海洋微生物是大洋中最活跃、最强大的地质营力之一, 它不仅对大气圈、水圈和岩石圈产生强大的影响, 而且也对洋底矿产资源的形成和分布具有明显的作用。H. L. Ehrlich (1981) 研究表明, 有些矿床, 例如硫化物、氧化物、碳酸盐矿床主

要是生物成因的；R. Magne (1974) 认为，在金属元素的表生迁移和富集以及其后的再沉积作用过程中，都有异氧微生物的参与。前苏联科学工作者别尔菲列夫和布特克维奇提出湖成铁矿形成过程是依靠自养细菌活动而形成的。М. И. Новожилова (1984) 在红海和印度洋西北部的海底，发现微生物从低浓度金属溶液中累积铁和锰的氧化物沉淀。W. L. Vanveen (1973), K. H. Nealson 和 J. Ford (1980), T. Takamatsu 及 M. Koigama (1988) 在研究自然界各种环境中（土壤、海水、冷泉、淡水湖等） Mn^{2+} 氧化作用的机理时发现微生物能在 pH 为 6—8 时，于好气条件下将 Mn^{2+} 氧化成高价锰的水合氧化物，而这种氧化过程比没有生物参与的作用过程要快得多。但以上研究者皆未说明是何种微生物对 Mn 的作用。

德国和美国等国的科学家主要从以下几个方面研究了锰结核的形成，即锰结核的地理分布与水深、上升流、生物生产率、最低含氧层、生物溶解作用和微生物等的关系。前苏联在研究中太平洋沉积层的 Fe、Mn 微结核时，认为在锰结核形成和结核中矿物形成过程的控制因素中有微生物的作用。美国俄勒冈州立大学的 J. Dymond 等人对结核的成因曾提出微生物作用使海底始终保持氧化环境，无机物中的铁、锰及其它金属被氧化产生不溶于水的氧化物，这种物质不断堆积，从而形成多金属结核。他认为微生物作用较之水成成因作用快得多。H. A. Buckley (1974) 观察到深海沉积物底栖有孔虫的空壳中具有清晰的成岩成因的 MnO_2 膜，据推测，这是由于这些有孔虫壳面上具有大量分散的富含蛋白质物质，认为这种有机物质为微生物提供了附着条件，而微生物群体则从海水中吸取了 MnO_2 。H. L. Ehlich (1963) 从锰结核中发现有锰还原细菌和锰氧化细菌，认为细菌活动有助于结核的形成。这些微生物学者虽然解释了锰结核的快速生长，但未涉及其化学反应与结核构造的关系。1984 年，前苏联海洋地质工作者对太平洋米德帕斯菲得海山等海域的锰结核进行研究时，在锰结核中发现了 $0.8\mu m$ 的棱角状自然铝，其周围有纤维状有机物集合体，认为这是生物成因的标志。

W. C. Burnett (1983) 对北太平洋锰结核表面上的小葡萄体进行了研究，指出：1) 铁、锰在顶部带中的含量呈正相关关系，锰含量尤其丰富，顶部带表面多半为球状细菌状态型斑点所占据，该带为葡萄体表面迅速成长部分；2) 葡萄体表面有丰富的类似微生物的物质。因此认为，金属组分在葡萄体表面富集过程中，可能有微生物参与。

微生物成矿作用的研究在长时期内进展缓慢，但近年来开始受到国际地学界的广泛关注，已作为地学发展的前沿领域来研究。近年来，越来越多地发现了微生物参与矿床形成过程的证据，并对微生物对某些金属的富集、运移和沉淀机制作了一些研究，此外还注意了磷块岩、硫化物矿的生物成矿作用的研究，但对锰结核的微生物成矿作用的研究还很薄弱，未进行过系统研究。

我国在微生物活动与成矿元素迁移聚集作用研究方面虽起步较晚，但已做了一些工作。阎葆瑞 (1988) 的研究成果表明微生物对铁、锰沉析作用远强于单纯的化学作用；刘雪娟 (1991) 研究了在藻类作用下，加速了 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} 的沉积（产生含铁的絮状物）；东野脉兴等 (1991) 研究了细菌成磷作用。魏东岩等研究表明嗜盐菌参与了盐类矿床的形成作用。陈志明，林汝霖等研究了铁质叠层石中藻类分布，表明微生物直接参与了铁的成矿作用。

我国大洋地质调查起步较晚，在大洋地质调查中，以前尚未涉及微生物成矿作用的研

究, 我们此次研究乃属首次。

综上所述, 关于洋底微生物活动与多金属结核成矿关系的研究还十分薄弱, 国外也处于探索阶段, 并未见有系统成果, 但从目前有限的文献资料中, 可以看出其潜在的重要作用及发展前景。

第四节 几个术语的解释

大洋水自水面至洋底与沉积物接触的界面是一个复杂的体系。组成大洋体系有两大边界, 即大洋表层水与大气构成的气—液界面系统和大洋底层水与沉积物所构成的液—固界面系统。这两个界面系统中物质的交换、金属的分布和变化都不相同, 其作用性质也不相同。它们是大洋中各种物理、化学和生物作用最为活跃的作用系统。在这两个界面之间的大洋水中元素的浓度及其垂向变化, 对研究海洋地球化学及洋底矿产资源的形成也具有重要意义。因此, 海洋学和大洋矿产资源的研究者们十分重视大洋体系中元素的分布、转移和聚散的变化规律及其物理化学和生物学过程的研究, 在研究中应用了一些概念和术语, 其中某些概念和术语至今还没有确切的涵义或对其有着各种不同的解释。微生物地球化学研究中使用过的许多术语, 曾作为一般概念来使用, 因而造成术语上的严重混乱。例如, 由于大洋采样技术和方法的限制, 以及研究目的不尽相同, 对一些术语就赋予了不同的涵义。本书中也引用了一些术语, 为了确切表达我们使用的一些术语的涵义, 现作如下表达和定义。

1. 大洋水

泛指底层水以上的海洋水。仅作为讨论各层水体中金属元素聚散变迁的背景和相互比较来研究的。

2. 表层水

系指大洋水面以下0.5—2 m深的水体而言。这是根据大洋调查时采集水样的深度来限定的。

3. 分层水

所谓分层水是指深度而言, 系指表层水以下, 底层水以上不同深度上的水体。HY 4-881航次的采样, 使用的采水器是由美国EGSG公司生产的SAMK—3型温盐深测量仪。本航次采样深度间隔为500米。

4. 底层水

系指和洋底沉积物表面相接触的海水及其以上200—300 m左右的水体。本次采样是采用温盐深测量仪和挂在箱式取样器上的采水器以及大型重力活塞采样器采集的。在用温盐深采样时, 因为受浮力和洋底流的冲击, 同时为避免仪器与沉积物接触撞击, 一般投放仪器总是要距洋底数十至数百米的距离, 即使是用箱式采样器采水样时, 也难以采集到直接与洋底沉积物界面接触处的水样, 甚至所取的水样位置离界面有几十—300 m不等, 故不能代表与洋底沉积物直接接触的界面水, 但它仍隶属于大洋水柱的底层, 所以我们统称之为底层水。

5. 孔隙水又叫做间隙水或软泥水, 是指赋存于沉积物颗粒孔隙空间的水溶液, 是沉积物这个多相体系中的液相部分, 它是与沉积物固相及底层水和微生物组成的水-岩-微生物

物系统中的一个组成部分。

6. 洋底水-岩-微生物系统

是指洋底沉积物及其表面的多金属结核和上覆的大洋底层水以及微生物所构成的相互作用体系。在这一系统中许多元素和化合物在洋底环境中（水、沉积物、结核之间）进行迁移、转化和循环。它们不仅与周围介质的物理化学作用有关，而且与微生物的生命活动有直接关系。正是由于洋底水-岩-微生物的相互作用，从而加速了各种元素或化合物发生聚集成矿或迁移、再循环。

7. 微生物生态系统的演替

微生物生态的演替通常是以菌群变化和环境条件改变为基础。演替一般系指某一环境下一菌种被另一菌种代替的过程，它反映了微生物群体增殖和退化的状况。各种不同的微生物在它们适应的环境中进行代谢活动，其中一部分微生物的活动可以使环境发生变化，使该种微生物不再适应原来的环境，开始减少或衰亡，最终被另一些新的能够适应变化后新环境的微生物群体所更替。随着微生物赖以繁衍的环境的变化，就可发生微生物生态系统的演替。伴随着这种演替，改变价态的元素得以迁移和聚集，从而构成了新的氧化还原体系。它可直接控制物质的化学反应，因此这种演替作用在有利条件下也直接或间接地参与成矿过程。

8. 微生物生化反应指标

微生物生化反应指标系指试样在相应培养基中培养，由微生物的生物化学作用所产生的反应生成物的数量或相对于初始浓度的百分含量（%）。微生物活动强度是以微生物生化反应指标的数量来确定的，生化反应指标数量愈大，即表明活动性愈强。

9. 新陈代谢 表示微生物生命活动中发生的总的化学反应。

10. 分解代谢 包括一切为了提供微生物细胞物质生物活动所需的能量和所进行的无机物和有机物分解的化学反应。

11. 自养微生物 能利用 CO_2 作为唯一碳源生长的微生物。

12. 异养微生物 需要比 CO_2 还原性更强的碳源—有机物作为碳源的微生物。

13. 好氧微生物 需要分子氧作为末端电子受体产生化学能反应的微生物。

14. 厌氧微生物 用除氧以外的无机化合物作为末端电子受体产生化学能反应的微生物。

15. 兼性厌氧微生物 能够进行厌氧生长和需氧生长的微生物，即能进行好氧生活也能进行厌氧生活的代谢。

第二章 研究区地质环境概况

多金属结核形成于洋底水-沉积物界面处,其分布随地而异,受地质环境和大洋底流作用的制约。本章扼要地介绍太平洋中部洋流与水团及地质环境概况。

第一节 研究区地理位置与地质背景

一、研究区的地理位置

研究区分为两个区,即位于中太平洋海盆的CP区和位于东太平洋海盆的CC区,CC区又分为A、B、C三个小区。CP区位于中太平洋海盆中东部,即 7°N — 12°N , 176°E — 178°W 范围内,控制面积约 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。CC区位于东太平洋海盆,大致在 $9^{\circ}00'$ — $14^{\circ}30'\text{N}$, $138^{\circ}00'$ — $148^{\circ}00'\text{W}$,控制面积约 $43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。CCA区为 $7^{\circ}45'$ — $11^{\circ}15'\text{N}$, $138^{\circ}45'$ — $142^{\circ}00'\text{W}$,面积约 $13.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。CCB区为 $7^{\circ}00'$ — $8^{\circ}45'\text{N}$, $146^{\circ}00'$ — $152^{\circ}00'\text{W}$,面积为 $8.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。CCC区为 $7^{\circ}0'$ — $9^{\circ}00'\text{N}$, $142^{\circ}00'$ — $146^{\circ}00'\text{W}$,面积约 $7.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。B区西端距火奴鲁鲁港约900海里,A区东端距夏威夷岛约850海里。研究区位置见图2—1。

二、研究区的区域地质概况

太平洋的面积约 $1.8 \times 10^8 \text{ km}^2$,占地球表面积的35%,占海洋总面积的49%,平均水深为3980m,是世界上最大的海洋,也是多金属结核最丰富、有用金属含量最高的大洋。据估算太平洋锰结核的储量约为 1.7×10^{12} 吨(Mero, 1965)。

(一) 地形特征

研究区位于太平洋中部的一系列深水海盆范围内,水深在4500—6000m之间,底部坡度较平缓,大部分为深海平原区,少部分为海底丘陵和海山地貌形态。现将研究区的地形地貌分述如下:

CP区地形走向为北西西,以槽沟和海丘相间出现为特征。该区西部为深水平原区,海底平坦,水深5500—6000m,西南部为海山区,大致位于 11°N 以南(11°N 、 179°E 与 7°N 、 177°E 两点连线以西),地形崎岖不平,海山呈线状排列,走向北西西至北西向,海山顶部水深一般为3500—4000m。中—东南部为深海盆地区,占研究区的大部分面积,地形走向为北西西,海山和海槽相间排列,海槽或线状盆地明显,水深一般为6000—6300m。CC区位于东太平洋海盆克拉里昂和克利帕顿两大断裂带之间的丘陵地区,大部分地区水深在4800—5200m之间,有自东北向西南逐渐加深的趋势。海底地形由北部海山向南渐变为台地和丘陵,而后再过渡为低丘区。地形走向主要呈东北—西南或近东西向,次一级地形走向则为近南北向。

CCA、CCB、CCC区据地形的形态组合及地形的相对高差可划分为海山区(高差大于500m、坡度大于 15°)、丘陵区(高差小于500m、坡度 0.5° — 5°)、台地区(高差为200—500m,宽展顶面)。海山区:位于CCA区 $10^{\circ}30'\text{N}$ 以北地区,大致沿着 $11^{\circ}00'\text{N}$ 纬度线呈东