

程广芬 涂仁亮 编译



大洋底锰结核

地质出版社

一九七一年九月二十四日

1112

04

内 容 简 介

本书扼要地阐述了日、美、苏、英、法等国近几十年来关于锰结核的研究成果。

本书内容包括锰结核的研究历史、物理性质、分布产状、矿物组分、化学成分、生长速率、成因和开发技术等八章。其中还特别强调了生物成矿作用的地质意义。

大洋底锰结核

程广芬 涂仁亮 编译

责任编辑 殷维翰

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ 印张: $4\frac{1}{4}$ 字数: 110,000

1981年6月北京第一版·1981年6月北京第一次印刷

印数1—1380册·定价1.10元

统一书号: 15038·新623

前 言

锰结核，又称锰团块或锰瘤，是分布于世界各地、特别是现代洋底的一种自生沉积物。自泥盆纪以来的各个地质时期中都有发现。锰结核主要由锰-铁氧化物和氢氧化物组成，并含有镍、铜和钴等有用金属元素。因其形态多呈结核状，而成分又以锰为主，故名。

就目前所知，在海洋中，锰结核是仅次于石油的一种重要海底矿物资源。据统计^①，仅太平洋底的锰结核储量就达16,600亿吨。其中含锰达2,000—4,000亿吨，镍90—164亿吨，铜50—88亿吨，钴30—58亿吨，可供全世界开采几百到几千年。此外，锰结核至今仍在不断生长，按其生长速率计算，每年可增长600—1,000万吨，实为取之不尽、用之不竭的“活”矿床。

多年从事锰结核研究的国家有美、日、苏、法、英、西德以及加拿大、瑞典、新西兰等。其中，日本是自七十年代以来才急趋直追从事大规模调查研究的。其调查区域主要集中于北太平洋的中、西部的低纬度地带。迄今，世界三大洋的大部分地区都已经普查过了，部分地区已达详查乃至试采阶段，如太平洋地区已累计有近万个测点。各国现已将北太平洋中部和东部低纬度地带圈定为开采区，在那里，正继续进行着详查和少量的试采工作。预计进入八十年代后，将投入商业性开采。

自从1872—1876年，英国海洋考查船《挑战者》号在环球考查中首次发现洋底锰结核以来，有关调查研究的报道就不断涌现。本世纪五十年代，当人们发现锰结核是一种很有前途的潜在资源后，关于它的研究成果纷至沓来。据不完全统计，至1976年止，

● 日本刊物《海洋科学》1976年，11期，12页和55页。

此类文献已达 2,300 余篇。这些成果既充实了地质科学的内容，又促进了海洋地质学的发展，更丰富了人类认识自然的知识宝库。可以预期，随着锰结核研究的继续深入，在海洋地质科学的一些领域中一定会不断地取得新的重要成果。

目前，我国对锰结核的研究，尚处于初步阶段。全国基础科学研究规划已将其列为重点项目之一。有关生产部门、研究机构和高等院校也正积极着手进行调查技术的研究、仪器的研制和样品的试采等工作。但配合这项工作开展的系统介绍锰结核的书刊，迄今未见问世。为此，我们编译了这本册子，期能引起有关同志对锰结核这一海底矿物资源的研究兴趣，也可供从事海洋地质工作的同志们参考。

本书主要参考日本原田宪一撰写的《锰结核》^①一文，并参阅有关文献编译而成。分别阐述了锰结核的研究历史、物理性质、分布和产状、矿物组分、化学成分、生长速率、成因、调查和开采技术等等。在综合介绍1979年以前的研究现状和成果时，侧重于以下三个方面：地区概况的介绍，以太平洋的调查研究成果为主；资料的取材，对日本的研究记录叙述较详；锰结核的成因，强调了生物作用的地质意义。

本书在编译过程中，承郝颐寿教授给予多方面的鼓励和指导，又蒙审阅和校订，在此深表谢意。

● 原文连载于日本刊物《海洋科学》1977年6、7、9三期。

目 录

前 言

第一章 研究简史	1
第一节 五十年代前	1
第二节 五十年代后	2
第二章 物理性质	7
第一节 外部特征	7
第二节 内部特征	13
第三章 分布和产状	21
第一节 区域分布	21
第二节 “化石”结核	25
第三节 共生沉积物	27
第四节 表面富集	29
第五节 埋藏结核	31
第六节 富集因素	34
第四章 矿物组分	36
第一节 锰矿物类	37
第二节 铁矿物类	41
第三节 铝硅酸盐类	42
第四节 矿物形成机理	42
第五章 化学成分	48
第一节 化学成分	48
第二节 区域性特征	57
第六章 生长速率	65
第一节 放射性测量法	65
第二节 核测年法	67

第三节	生物地层法	69
第四节	浅海结核	71
第七章	成因	75
第一节	金属来源	75
第二节	输送方式	81
第三节	形成机理	83
第四节	展望	92
第八章	开发技术概论	96
第一节	调查技术	96
第二节	开采技术	109
参考文献		116

第一章 研究简史

锰结核研究，迄今已逾百年。其间，前七十年纯粹为现场考察和初步理论研究的时期，尚未认识其有若何经济价值。战后，特别是进入五十年代以来，由于一些工业发达国家对锰、镍、铜和钴等矿产的需求量迅速增加，依赖进口的程度日趋严重（如日本，目前进口量：锰92%，铜80%，镍和钴100%）。适逢其时，人们发现锰结核是一种很有价值的多金属矿物资源，而现代工业技术和工艺水平已使锰结核的开采和冶炼成为可能。于是，锰结核就迅速地引起了许多国家的重视。锰结核的调查研究也就进入了一个蓬勃发展的时期。

第一节 五十年代前

由于《挑战者》号的环球考察（1872—1876）发现了洋底锰结核（Thomson, 1874）。最初，这些锰-铁氧化物引起了化学家们的注意。早在1877年，默里（Murray）就论述了锰结核的成因同海底火山活动所提供的锰-铁关系密切。京贝尔（Gümbell, 1861）记录并指出阿尔卑斯下侏罗统的锰结核和深海结核的性质相似，并认为结核的锰-铁是来源于热液（1878）。接着，伯奇南（Buchanan, 1881）说明锰结核是由有机物产生的金属硫化物在海底氧化而成的。另外，迪拉法特（Dieulaufait, 1883）论述了生物活动，特别是细菌活动引起的元素富集同锰结核成长的关系。默里等人在《挑战者》号调查报告（1891）中，详细记载了锰结核的产状、形态、物理—化学等性质，并阐述了由海底火山岩风化后提供的锰-铁控制了锰结核成长这一见解。

随后，参加过《信天翁》号航海调查的阿加西斯（Agassiz,

1901) 在综合底质取样的成果时, 确认锰结核广泛分布于太平洋的东南部, 并编制了分布图。

然而, 此后近五十年中, 锰结核的研究几乎没有什么进展。原因之一是回声测深仪的发展, 取代了缆绳测深法, 从而剥夺了海底取样的机会。

截至四十年代末的七十多年中, 有关锰结核的调查研究资料还不到170篇。

第二节 五十年代后

二次世界大战以后, 海洋地质的发展, 揭开了锰结核研究的新的一幕。大规模的海洋调查, 以及用取样管、拖网、挖泥斗等取样器在各大洋进行的底质取样, 查明了锰结核的分布是广泛的。海底摄影和电视又揭示了锰结核在海底的存在状态。

迪茨 (Dietz, 1955) 在东北太平洋的厄尔本平顶海山 (Erb-en Guyot)、菲伯林平顶海山 (Fieberling Guyot) 附近的拖网作业, 采到了大量的锰结核和皮壳。参加瑞典深海调查的伯里托等 (Berrito and H. Rotschi, 1956) 报道了锰结核在中、西赤道太平洋的分布。此后, 《顺风》号在东南太平洋考察时, 曾把调查锰结核的分布作为主要目的之一, 根据活塞取样管取样和海底摄影, 发现锰结核广泛富集于海底表面上 (Menard and Shippek, 1958; Shippek 1960)。米纳德和希皮克 (Menard and Shippek, 1958)。根据该地区的储量推断, 全太平洋的锰-铁含量为 10^{16} 克。米纳德 (1960) 还发现东太平洋锰-铁氧化物的层板富集的区域很广。此外, 斯科尼亚科娃和曾柯维奇 (Skornyakova and Zenkevich, 1961) 综合了苏联《勇士》号在太平洋的一系列调查成果。斯科尼亚科娃等 (1964) 编制了太平洋全区锰结核分布图 (图3.4)。

另一方面, 由于测定锰结核的生长速率而激起了人们对锰结核化学特征的兴趣。彼得松 (Pettersson, 1943) 测定《挑战者》

号调查采集的锰结核中 ^{226}Ra 的分布, 推断其生长速率为 1 毫米/千年 (Pettersson, 1955; Von Buttlar and Houtermans, 1950)。

然而, 戈德堡等 (Goldberg and G. Arrhenius, 1958) 批判了彼得松的方法, 另行根据 ^{230}Th 的分布, 得到了几十毫米/百万年这一生长速率 (Goldberg, 1961a, 1961b, 1963)。戈德堡等 (1958) 还根据海水中元素的活动性, 论证了结核的生长速率取决于无机沉淀的生成。以后, 有关各种放射性元素在锰结核中的分布和构成锰结核的金属元素的地球化学活动性方面的研究就盛行起来了。

这样, 在五十年代, 确认了锰结核的广泛分布, 有关它的化学知识也迅速地增长。就是在这种背景下, 锰结核作为潜在的矿物资源而开始引人注目了。梅罗 (Mero, 1959, 1962) 整理了《挑战者》号、《信天翁》号和《顺风》号的考察成果, 计算出太平洋各地锰结核的平均化学成分, 推断锰结核的储量为 10^{18} 克, 进而又详细论述了锰结核可以成为获得铜、镍、钴等有用金属的新来源 (Mero, 1965)。由于他的研究, 人们的注意力都集中到锰结核作为海底矿物资源这一点上, 世界各国 (美、苏、德、日、法和新西兰等) 作了大量的勘探工作, 研究了开发技术。特别是美国, 作为“国际海洋研究十年计划” (IDOE) 的一环, 于七十年代初实施了“校际洋底铁锰沉积矿产研究计划”, 提出了大批研究成果, 论文涉及锰结核的地质、矿物、地球化学和勘探方法等方面。另外, 霍恩 (Horn, 1972) 综合整理已得资料, 编制出锰结核和其中的锰、铁、镍、铜等的含量以及沉积物分布图, 得出了太平洋中、东部低纬度的深海硅质 (放射虫) 软泥带是最有希望的结核矿产区。摩根斯顿等 (Morgenstern, 1973b; Project Program, 1975) 对夏威夷东南海域推行了结核分布、产状、矿物及化学成分和成因等方面的综合研究。

五十年代以来 (截至 1976 年), 已发表有关锰结核的资料约 2,100 余篇, 相当于前七十年的 13 倍。

在日本, 锰结核研究始于 1927 年 (Iimori, 1927), 但在战

前, 研究成果寥寥无几。二次世界大战结束以后的一段时间里也只有少数单位开展了一些调查研究, 例如: 东京水产大学(Niino, 1955, 1959; 水产大学报告, 1963); 东京大学海洋研究所(Tomoda 1968; Inoue等, 1969); “日本深海考察”(JEDS)(Nasu and Sato, 1962)等。

到六十年代后半期, 理化研究所作过一些研究(Shima and Okada, 1968; Shima等, 1976); 公害资源研究所也开展了工作(Sano and Matsubara, 1970; Itoh, 1971); 资源协会为研制开采技术, 进行了航海调查(Kuroda, 1971; Tamura, 1972)。

日本对锰结核的大规模调查研究工作, 开始于七十年代。1970—1971年执行了“深海底矿物资源开发基础的调查研究”计划, 调查的海域为马里亚纳海沟附近一带(图1.1①'45、'46)。

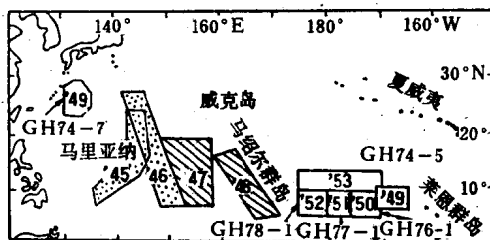


图 1.1 日本“深海底矿物资源勘探基础研究”海域
(据Mizuno and Moritani, 1977)

从1972年起(预计到78年)开始执行“深海底矿物资源勘探基础研究”-的特别研究计划。目的在于找出并确定用什么方式勘探太平洋深部海底矿物资源, 同时查明以锰结核为主的海底矿物资源的存在形式、矿物和化学成分以及形成过程等, 为有效地开发利用提供基础资料。其中, 1972—1973年度由《望星丸》调查塞班岛以东和马绍尔群岛西北部海域(图1.1'47、'48)。1974—1978年, 由《白铃丸》用各种方法系统地研究了可能含铜、镍较高的锰结核赋

① 本书插图由沈宏远同志协助整理。

存区之一的中太平洋海盆部分区域($6^{\circ}30' - 13^{\circ}N$, $164^{\circ}W - 175^{\circ}E$) (图1.1' 49—'53)。此外, 1974年还调查了冲绳以东的大东海岭区域 (Mizuno and Moritani, 1977)。

上述调查的部分成果曾经指出: 已发现塞班岛东北、麦哲伦海山群的一些小平地 (水深 5,600 米左右) 上有着大量锰结核; 并查明马绍尔群岛西北部海域, 水深 4,000 米以下的红粘土中普遍含有锰结核; 大东海岭及其附近海域, 虽然在海盆底部没有发现锰结核, 但在海山的部分斜坡和山顶地区, 则普遍存在着富含铁、钴的结核和皮壳; 在中太平洋海盆区域, 已查明测区内 $8^{\circ}N$ 附近以南, 结核发育极为贫乏。虽然在 $8^{\circ} - 10^{\circ}N$ 附近的岛状富集区中, 每一“岛”的范围从 10 余公里到 100 公里不等, 但超过 10 公斤/平方米的区域是相当有限的 (图 1.2、图 3.7) (Mizuno and Moritani, 1977)。

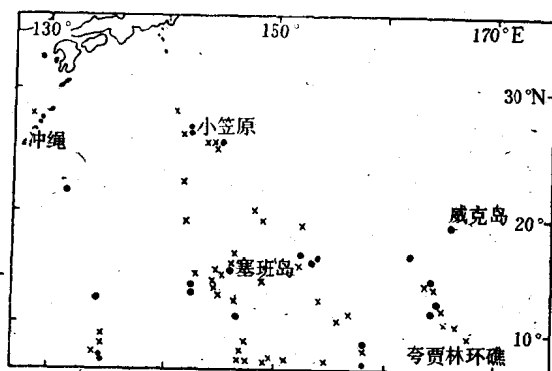


图 1.2 日本在1970—1973年的采样点示意图
示存在锰结核的地点 (Mizuno and Moritani, 1977)。

六十年代以来, 国际上研究锰结核的一个特点是组织了国际联合机构, 共同对一些有希望地区进行勘探、详查以及开采、冶炼技术的研究和试验。目前, 有关开采地区的选择、开采手段的研究、矿石的试采以及冶炼技术的研究和试验已经和接近完成, 至八十年代初期到中期, 就将正式投入商业性开采和冶炼。这是

一些工业发达国家和跨国公司的打算。但是，有关人类如何公平合理地共同利用锰结核等海洋资源问题，虽经联合国及其所属海洋法会议多次讨论，但在发展中国家同工业发达国家之间存在的原则分歧，至今仍悬而未决 (Akash, 1976)。

从六十年代后半期起，由于对锰结核研究的逐步深入和多样化，研究成果可称丰硕，截至 1976 年，总计已达 2,353 篇，表 1.1 是按出版时间排列的已发表文献篇数统计。迈兰等 (Meylan, Dugolinsky and Fortin, 1976) 集 1874—1975 年间出版的研究论文之大成，完成了文献索引集。原田等研制了利用电子计算机的自动文献检索装置。现在，涉及多种领域的快速文献检索已成为可能。

锰结核研究文献篇数的统计 (括号内为

日本研究者发表数，包括在总数内)

表 1.1

1874...1	1903...1	1928...5	1946...2	1963...46 (3)
1876...2	1906...2	1929...3	1947...3	1964...78 (7)
1877...1	1908...2	1930...3	1948...7	1965...87 (7)
1878...2	1909...2	1931...2	1949...7	1966...103 (4)
1881...4	1910...5	1932...6 (1)	1950...12	1967...121 (4)
1882...1	1914...1	1934...5 (1)	1951...8	1968...131 (12)
1883...1	1915...1	1935...7 (1)	1952...13 (1)	1969...145 (11)
1884...2	1916...2	1936...8	1953...14 (2)	1970...185 (12)
1885...1	1917...1	1937...8	1954...12 (1)	1971...179 (16)
1887...2	1918...1	1938...4	1955...18 (1)	1972...229 (27)
1891...2	1919...1	1939...3	1956...17 (2)	1973...206 (12)
1892...2	1920...1	1940...6	1957...15 (2)	1974...179 (17)
1894...1	1922...2	1941...5	1958...17	1975...132 (29)
1898...1	1923...2	1942...7 (1)	1959...37 (5)	1976...83 (62)
1900...1	1924...4	1943...6	1960...39 (2)	
1901...2	1925...1	1944...3	1961...35 (9)	
1902...1	1927...3 (1)	1945...4	1962...44 (3)	

第二章 物理性质

第一节 外部特征

颜色：锰结核的颜色由浅褐色至土黑色。富铁层主要是淡红褐色，而富锰层则以金属黑色为主。

硬度：结核硬度按莫氏硬度表为 1—4，平均为 3。一般在海底时较软，取出海面后，随着变干而逐渐变硬变脆。

密度：结核密度为 2.1—3.5 克/立方厘米，平均 2.2—2.4 克/立方厘米 (Mero, 1962)。由于密度关系到结核生长速率的确定，所以必须精确地测定其密度值 (详见第六章)。

粒径：结核长径 1—25 厘米，平均 3—7 厘米。深海平原结核的粒径一般较小，大陆边缘及海山附近的较大 (Nohara, 1976a)。

迄今所知，最大的一个锰结核产于菲律宾以东 300 英里处，是在打捞海底电缆时采到的，重达 850 公斤，现已不存 (Mero, 1962)。现存的最大者为采自北太平洋水深 5,500 米处的同一量级的结核，重达 620 公斤，长径 1 米 (Bonatt and Nayudu, 1965)。

形态：结核呈多种形态。据记载，有扁球形、扁圆形、长扁圆形、椭球形和球形等 (图 2.1, 2.2)，还有呈共生状者 (Moritani, 1976)。多数形态不对称。呈球形对称者，似乎仅限于直径 3 厘米以下的小型结核

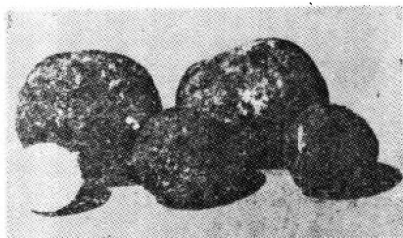


图 2.1 球状锰结核
(产于印度洋水深 4,500 米处，左下为乒乓球) (据 Saito, 1976)



图 2.2 扁球状 (1) 和扁圆状 (2) 锰结核 A: 俯视, B: 侧视
(据 Cronan, 1976)

和埋藏于沉积物中者 (Raab, 1972) 尤其在小型结核中, 外形多受其内核形状的控制 (Mero, 1962)。

表面构造: 根据拉布 (Raab, 1972) 划分如下:

- 1) 光滑状: 表面光滑, 有时见有黑色光亮的斑点。
- 2) 砂粒状: 砂粒径或小于砂粒径的颗粒松散地粘着于“鹅头凸”表面。
- 3) 鹅头凸: 特点是附有大量小瘤。一般构成砂粒状构造的基底。

4) 豆石状或瘤状: 大于 2 毫米的颗粒, 有的可互相连接起来。颗粒中也有大达 2 厘米者。

同一结核表面的构造并不均一, 接触海水的一面多呈光滑状, 而埋没于沉积物中的一面则为砂状 (图 2.3)。而瘤状面发育于泥-水界面的环带上 (Raab, 1972; Moritani, 1976; Greenslate, 1974 a)。这种情况可以这样解释, 即光滑面是沉积缓慢或受侵蚀的结果; 实际上生长是在砂状面上进行。而在瘤状部分, 生长最为活跃。同样, 拉布 (1972) 对同一结核最外层的化学成分作了调查, 发现接触海水的光滑部分比接触沉积物的砂状部分, Fe、Co、Pb 相对富集, 而 Mn、Cu、Ni 较少。他认为这一现象是由于接触海水一面的 Mn、Cu、Ni 受到选择性淋滤, 从而 Fe 等相对富集。相反, 接触沉积物的部分是由富集于空隙水中的 Mn、N、Cu 供给的。盛谷 (Moritani, 1976) 也认为, 凡具有光滑表面的锰结核, 锰含量都相对地较低。对此, 根据大型结核接触海水一面的层发育良好的事实 (Kinoshita, 1976), 也有人认为接触海水的一面也在进行着生长 (Glasby, 1973a; Nohara, 1976a)。

此外, 虽然拉布 (1972) 和梅罗 (1962) 谈到, 从结核的形态来看, 很难说结核发生过转动, 但索利姆 (Sorem, 1973) 指出, 从形态上表明发生过转动的样品是有的。

在有的地区采到的结核, 具有形态上的相似性, 但同别的地区的结核相比, 大都能从形态上加以区别 (Mero, 1965; Menard, 1964, 1976)。然而同一地点的结核在形态上的差别也是相当

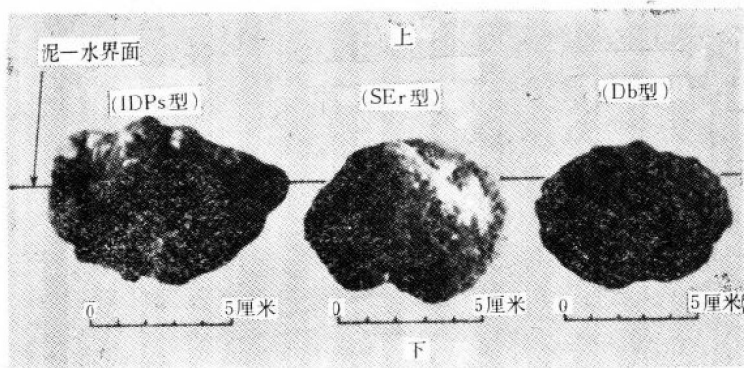


图 2.3 锰结核的产状 (泥-水界面和表面构造的关系)
(据 Moritani 和 Mizuno 等 1977 年改编)

大的 (Mizuno and Chujo, 1975; Moritani, 1976), 而且由于缺乏有关结核分布范围以及该范围内结核形态的系统资料, 所以在目前还不能真正了解结核形态同海底地质的关系。

不少人曾从形态上对结核作过分类 (Meyer, 1973b; Meylan, 1974; Moritani, 1976)。其中盛谷 (1976) 把锰结核划分为九种类型, 如表 2.1 所示。每种类型所对应的结核形态见图 2.4。不少

锰结核的形态分类
(Moritani, 1976)

表 2.1

类 型	大 小	形 态	表面特征
Sr	小~中	球状/椭球状	粗糙 (粒状或微葡萄状)
SPr	小~中	球状/椭球状/共生状	粗糙
SEr	中~大	球状/椭球状	粗糙~葡萄状
Db	中~大	圆盘状/椭球状	粗糙~葡萄状
Ss/SPs	小~中	球状/共生状	光滑 (或微粒状)
DPs	小~中	扁平状/圆盘状/共生状	光滑
IPs	大	不规则状/球状/扁平状/角砾状/破碎状	光滑
IDPs	大	不规则状/圆盘状/扁平状/破碎状	光滑
V	小~大	不规则状	

△: 类型; 大、小字母分别代表形态、表面特征 (γ—粗糙, S—光滑)
大小: 小: <4厘米, 中: 4—6厘米, 大: >6厘米。

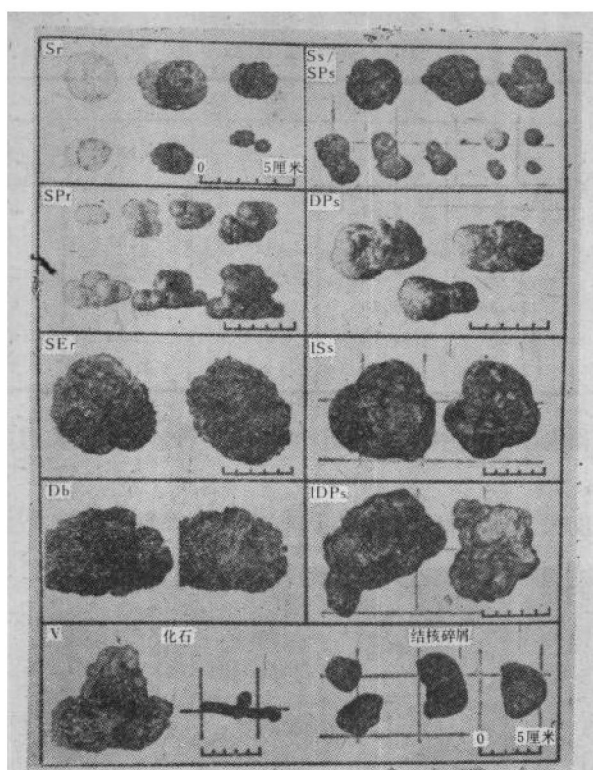


图 2.4 锰结核的形态类型

(据Moritani, 1976)

人认为, 结核的不同类型同结核的金属含量之间有着某种内在联系。如迈耶 (Meyer, 1973b) 就曾指出过这种关系。根据盛谷的上述分类, 至少在中太平洋海盆东部地区, 表面光滑的结核含 Mn、Cu 和 Ni 较高, 含 Fe 和 Co 则较低; 表面粗糙的结核则呈相反的趋势 (表 2.2, Mizuno and Maritani, 1977)。

除锰结核外, 锰氧化物还以下列形式沉淀。

1) 微结核 (Micronodules): 通常为一毫米以下的微粒, 广泛分布于远洋沉积物特别是红粘土中 (Price and Calvert, 1970)。不久以前, 格林斯莱德 (Greenslate, 1974b) 从硅质化