

生物矿物学

戴永定等编

地质工业出版社

生物矿物学

戴永定 等著

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

生物矿物学是本世纪 70 年代出现的边缘学科, 近年来在国际上已越来越引起重视, 但包括多数生物门类的综合性和系统性较强的著作至今尚未见到。本书是著者积 20 多年的研究成果并搜集大量中外文献资料而写成的综合性、系统性专著。书中提出了生物矿物体的矿物、结构和类型演化的新观点, 生物矿物体的鉴定方法和鉴定表。本书无疑会对该学科的研究以及地质科学和生物科学等有关学科的发展起到积极作用。

本书可作为地质、生物、农业和医学人员从事研究和教学的参考书, 也可作为鉴定生物硬体和化石的工具书。

生物矿物学

戴永定 等著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $36\frac{1}{4}$ 印张 2 插页 916 千字 印 1-2500

1994 年 5 月北京第 1 版 1994 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0857-2 TE·802

定价 38.25 元

序

由于人类对自然规律的认识日益深广，生产进步对科学技术的要求也日益精专，自然科学的发展经历了一个学科越分越细、专业越来越窄的阶段。进入 20 世纪以来，另一种趋势抬头，学科间相互渗透和融合，产生了许多边缘学科，开拓着自然科学的新领域，促进着自然科学的新发展。20 世纪上半叶，地学与数理化之间的学科渗透，使地球化学、地球物理和数学地质逐渐成为独立学科；而天地生学科间的边缘学科，天文地质学和生物地质学到 20 世纪下半叶才起步发展。古生物学和生物地层学作为独立的学科在 19 世纪末已经成型，而生物地质学的一些基本领域，生物沉积学、生物岩石学、生物矿物学和生物地球化学近 30 年来才开始发展。

目前国际上对生物矿物学和生物岩石学的研究颇为重视，发表的论文日益增多，已有单门类或综合几个门类的研究专著问世，但包括多数生物门类的综合性和系统性较强的著作至今尚未见到，戴永定等同志积近 20 年的努力，收集了大量标本和文献资料，坚持了长期不懈的研究，撰写出《生物矿物学》一书，是一次大胆的和创新的尝试，也是一次十分有益的尝试。

本书内容丰富，观点新颖，包括的生物门类比较齐全，对各门类生物矿物体的成分、结构、构造、形态及成因都作了详细讨论，并介绍了它们的矿物学特征及鉴定方法，这方面的成就目前为国内外所首见。本书的出版不仅将为生物硬体和化石类别的鉴定提供新方法，并且将为研究古生物群落和生态、沉积环境、化石埋葬学以及生物矿床的形成机制和分布规律提供参考，对研究某些生物学方面的新课题也具有一定的参考意义。因而，也可以说，本书的成果为地质科学和生物科学的某些有关的学科增添了新的研究内容，无疑会对地质科学与生物科学的进步发挥促进作用。

郝诒纯

1991 年 5 月

前 言

生物矿物学是生物地质学的基础分支学科，是研究生物矿物及其集合体的物质组成、内部结构、外部形态、物理和化学性质、生理功能，以及形成条件、矿化过程和演化历史。国际上对生物矿物学虽已有相当广泛深入的研究，但至今尚无综合性书籍问世。为推动我国生物矿物学研究的进展，促进古生物学、沉积学、古地理学和生物组织学的发展；为解决地质、农牧渔业和医药等方面对生物矿物体鉴定的需要；为合理勘探和开发生物矿物及有关资源——生物矿床，石油天然气、煤、铁、锰、磷、硫、铜、铅、锌、白云岩和石灰岩等矿床；为满足高等院校和研究机构对该学科教学上的需要，决定撰写一本生物矿物学的综合性、系统性著作。

全书分总论 6 章，介绍生物矿物学研究概况，生物矿物，生物矿化作用，生物矿物体的结构、构造、类型、形态和鉴定，并论述它们的演化规律；各论 14 章，叙述每个门类生物矿物体的形态、构造、结构和矿物成分，以及生物矿化作用、区别特征和时代分布。所有门类以门纲目，甚至超科或科为单位编制了生物矿物体特征一览表，并附有系统的偏光显微镜图片和少量扫描电镜图片。本书撰写人：第七章吴浩若（放射虫）、傅瑜（有孔虫），第八章张维，第十、十一章王家珍，第十二章杨万容，第十三章冯儒林，第十四、十八、十九章戴永定、王家珍，第十六章王家珍、戴永定，第二十章杜乃正、戴永定，其余章戴永定。全书由戴永定统审修改定稿。

本书是在生物化石碎片鉴定和其后的化石岩石学研究工作的基础上，进一步深入研究、广泛收集生物矿物学资料，按照生物矿物体演化的学术观点撰写而成的。参加过生物化石碎片鉴定工作的先后有戴永定、蒋协光、赵生才、侯奎和李菊英等。参加过化石岩石学研究工作的先后有戴永定、李菊英、侯奎、冯儒林、王家珍、陈丽华、周文宝、傅瑜、张荫本、杨万容、陈金华、陈延成、吴浩若、张维、杜乃正和李钟模等。

本书撰写是在叶连俊教授和孙枢教授指导下进行的，尹赞勋教授生前曾多次给予热情鼓励。扬敬之教授和范嘉松教授也经常给予指导。工作过程中得到主管单位中国科学院地质研究所大力支持，中国科学院南京地质古生物研究所，中国科学院植物研究所，中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院，四川石油管理局勘探开发研究院，原广西石油勘探指挥部，煤炭工业部煤炭科学研究院西安分院，地质矿产部贵州省地质局 108 地质队和化学工业部化学矿产地质研究院等单位亦给予积极支持和协助。王鸿祯、郝诒纯、穆恩之、朱浩然、刘瑞玉、何镜宇、曾允孚、吴望始、俞昌民、王大珍、田宝林和项礼文等教授审阅过有关章节。中国科学院南京地质古生物研究所，中国科学院青岛海洋研究所，中国科学院古脊椎与古人类研究所、动物研究所、微生物研究所和植物研究所，以及中国地质科学院地质研究所、北京大学等单位有关教授和专家王玉净、何炎、王克良、章森桂、邓占球、董得源、林焕令、陆麟黄、胡兆珣、金玉珩、姚益民、钱逸、穆道成、余汶、陈楚震、梁希洛、邹西平、王成源、王志浩、曹瑞骥、穆西南、王振、张善祯、张锦和、刘锡兴、刘宪亭、赵资奎、应育浦、刘月英、吕人豪、朱为庆、李家英、王崇友、金善燾、王英华等也对本书各章节进行过审阅。本书英文详细摘要由刘铁兵、杨群和苏宗伟审阅。本书所用薄片多由苏之臻

磨制，图片大多由桂文立和张亚光摄制，插图由邵兴亚复制、李凤仙清绘。石玉泉、王文瑚、曹士锦、詹天卫和沈继英参加了稿件清理工作。苏宗伟、杨洪钧、陈丽蓉、黄金森和张芬来曾给予许多帮助。

本书的出版得到了中国石油天然气总公司王涛总经理，石油勘探开发科学研究院李德生总地质师，中国科学院资源环境局局长孙枢教授，中国科学院地质研究所叶连俊、范嘉松、易善锋教授和黄家宽副研究员，中国科学院南京地质古生物研究所卢衍豪、穆恩之、唐天福教授，国家地震局高文学、徐道一教授，中国地质大学郝诒纯、何镜宇教授，成都地质学院曾允孚教授，南京大学张永骆教授等人各种形式的支持。中国科学院南京地质古生物研究所“现代古生物和地层开放研究实验室”对本书完稿和出版给予经费资助。

作者向曾经指导、支持、鼓励和协助本书撰写和出版的一切单位和同志表示衷心的感谢！由于作者学识有限，书中涉及地质学和生物学问题十分广泛，因此难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

作者
1990年6月

目 录

序

前言

第一篇 总论	(1)
第一章 生物矿物学研究概况	(3)
第二章 生物矿物	(13)
第三章 生物矿化作用	(72)
第四章 生物矿物体结构	(88)
第五章 生物矿物体的类型、构造和形态	(102)
第六章 生物矿物体的镜下鉴定	(116)
第二篇 各论	(129)
第七章 原生动物门 PROTOZOA	(131)
第八章 海绵动物门 SPONGIARIA	(144)
附 古杯动物 ARCHAEOCYATHA	(158)
第九章 腔肠动物门 COELENTERATA	(162)
第十章 环节动物门 ANNELIDA	(179)
第十一章 节肢动物门 ARTHROPODA	(183)
第十二章 苔藓动物门 BRYOZOA	(192)
第十三章 腕足动物门 BRACHIOPODA	(203)
第十四章 软体动物门 MOLLUSCA	(216)
第十五章 棘皮动物门 ECHINODERMATA	(257)
第十六章 脊索动物门 CHORDATA	(282)
第十七章 细菌 BACTERIA	(303)
第十八章 菌层沉积 BACTERIA LAMINATED DEPOSITS	(321)
第十九章 藻 类 ALGAE	(332)
第二十章 高等植物 HIGHER PLANT	(375)
参考文献	(394)
BIOMINERALOGY ABSTRACT	(433)
图版及图版说明	(464)

CONTENT

Preface

Foreword

PART I GENERAL	(1)
Chapter 1 A Survey of Biomineralogy	(3)
Chapter 2 Biomineral	(13)
Chapter 3 Biomineralization	(72)
Chapter 4 Texture of Biomineral Body	(88)
Chapter 5 Type, Structure and Morphology of Biomineral Body	(102)
Chapter 6 Recognition of Biomineral Body	(116)
PART II RARTICULARS	(129)
Chapter 7 Protozoa	(131)
Chapter 8 Spongiaria	(144)
Appendix Archaeocyatha	(158)
Chapter 9 Coelenterata	(162)
Chapter 10 Annelida	(179)
Chapter 11 Arthropoda	(183)
Chapter 12 Bryozoa	(192)
Chapter 13 Brachiopoda	(203)
Chapter 14 Mollusca	(216)
Chapter 15 Echinodermata	(257)
Chapter 16 Chordata	(282)
Chapter 17 Bacteria	(303)
Chapter 18 Bacteria Laminated Deposits	(321)
Chapter 19 Algae	(332)
Chapter 20 Higher Plant	(375)
REFERENCES	(394)
BIOMINERALOGY ABSTRACT	(433)
PLATES AND PLATE DESCRIPTIONS	(464)

第一篇 总 论

第一章 生物矿物学研究概况

一、研究内容和意义

生物矿物学的研究对象是生物矿物及其集合体——生物矿物体。其研究内容包括生物矿物的化学组成、晶体结构、结晶形态、物理和化学性质、生理功能和产状，生物矿物体的物质组成、结构构造、形态、生态和演化、以及生物矿化作用的机理、条件和过程。

生物矿物学的研究目的是为了充分开发生物矿物资源（包括生物矿床），应用于石油、煤炭、化工、冶金、建筑、工艺美术和医药等部门；彻底查明生物矿物体的生理功能与内部矿物组分和结构构造的关系，从而为人工合成矿物材料提供依据；准确鉴定沉积物（岩）中生物矿物体（简称生矿体）及其碎片，以确定沉积环境和时代，进而推测其含矿远景和储矿特征；科学养殖和防护各种具生矿体的农牧渔产品，以提高其质量和产量；仔细比较古代与现代生矿体，以便对古生物正确分类和鉴定，并探讨其演化；详细分析古代生矿体的同位素、元素、矿物和结构构造特征以推断古代地质环境。

二、研究历史

生物矿物学的发展与其他分支学科一样，经历了从宏观到微观，从静态到动态，从描述鉴定到探讨成因和演化的发展历史。目前它的发展已经历三个阶段，正向第四个阶段飞跃。

1. 早期阶段（20~30年代）

虽然早在上世纪中叶就开始用显微镜鉴定珊瑚的生物矿物体结构构造和矿物成分，但真正的生物矿物学研究是从本世纪20年代初，因珍珠养殖业的需要才开展起来的。首先是德国施密特（Schmidt, 1924）用偏光显微镜对双壳类及各种动物硬组织进行系统观察。接着，丹麦伯吉德（Bøggild, 1930）用偏光显微镜深入研究现代和化石软体动物贝壳，发表软体动物壳层显微结构论著，并提出显微结构分类。与此同时，瑞典奥斯汀（Austin, 1924）用偏光显微镜对硬骨化石进行岩石学和矿物学研究，德国格罗斯（Gross, 1926）对人体牙齿质和牙釉质的晶体结构进行研究。

2. 中期阶段（50~60年代）

二次世界大战后，西北欧和北美有些生物分类学家和古生物学家在形态学研究基础上再用偏光显微镜深入研究生矿体结构，后期辅以透射电镜和扫描电镜。一些重要门类的主要生物硬体和化石的显微结构研究文章陆续发表。其中比较著名的学者有：研究有孔虫的伍德和洛布利克；研究珊瑚的王鸿祯、阿洛瓦托和加藤，研究苔藓虫的塔弗纳—史密斯、博德曼和桑德伯格，研究腕足类的威廉斯，研究软体动物的厄尔本、泰勒和班德尔，研究棘皮动物的劳普，研究脊椎动物鱼类的厄尔维格。当时研究生物矿物仅限于钙碳酸盐和钙磷酸盐，前者如蔡夫和洛温斯坦，后者如纽曼。当时有机基质概念已经建立，生物的矿化作用理论存在着间隔说和模板说的对立和争论，这两学说均来源于脊椎动物硬骨研究。60年代末在西北欧已形成三个研究中心，即以厄尔本为首的德国波恩大学古生物研究所，以泰勒为首的伦敦不

列颠自然博物馆古生物部和动物部，和以厄尔维格为首的斯德哥尔摩瑞典自然博物馆古动物部。为了石油勘探中生物化石碎片鉴定的需要，美国出版了《无脊椎动物化石碎片在岩石和薄片鉴定》(Majewske, 1969) 和《化石岩石学导论》(Horowitz, 1971) 两本书。两书收集了重要门类中主要生矿体的结构和矿物成分资料，但未统一各门类生矿体结构术语。

3. 近期阶段 (70~80 年代)

为研究生物硬组织的矿物组成和形成机理，由全世界研究这个问题的古生物学家、生物组织学家、生物化学家和牙科骨科医学家共同发起，1970 年在德国美因兹 (Meinz) 举行了第一届国际生物矿化作用 (Biom mineralization) 讨论会，会上成立了生物晶体研究委员会 (Research Commission on Biocrystallites)，决定每四年举行一次国际生物矿化作用讨论会。此后，1974 年在美国南卡罗来纳乔治城 (George town)，1977 年在日本三重县贤岛 (Kashikojima)，1982 年在荷兰海牙雷讷瑟 (Renesse)，1986 年在美国德克萨斯州阿灵顿 (Arlington)，1990 年在日本东京小笠原 (Odawara)，先后举行过五次国际生物矿化作用讨论会。会后出版与会议同名的论文集，即《生物矿化作用》(Zipkin, 1973)、《无脊椎动物和植物的矿化作用机理》(Watabe, 1976)、《动植物生物矿化作用机理》(Omori, 1980)、《生物矿化作用和生物的金属聚集》(Westbroek, 1983)、《动植物生物矿化作用的起源、演化和现代概况》(Crick, 1989)、《生物系统中矿化作用的机理和系统发育》(Suga, 1991)，会议议题由生矿体结构转向生物矿物，由强矿化门类转入弱矿化门类，由高级生矿体扩大到低级生矿体，甚至生矿粒和簇，由单类研究发展到综合研究其成因和演化。

由于透射电镜、扫描电镜和电子探针新技术的广泛使用，绝大部分门类的主要生矿体结构和矿物成分已经查明，并以目纲，甚至门为单位进行总结，如研究海绵的哈特曼和文特，研究苔藓虫的桑德伯格，研究双壳类的泰勒和研究海胆的史密斯等。各门类次要生矿体，如牙齿、鳞片、耳石、蛋壳和骨针等也开始广泛研究，其中最著名的学者要数洛温斯坦。戴永定 (1977) 在大量生物化石碎片鉴定资料的基础上，提出生物化石钙质结构的点线面体的分类和演化。渡边则光 (1981) 也对钙碳酸盐生物晶体形态习性划分为三向均一、单向延长和双向延长三类。

本阶段初期，克伦肖 (Crenshaw, 1972) 根据对双壳类有机基质的研究，提出生物矿化作用离子异变说，认为不溶有机基质起间隔作用，可溶有机基质起模板作用。后来以色列韦纳 (Weiner, 1983) 总结发现不溶有机基质形成构架，主要由甘氨酸和丙氨酸组成；可溶有机基质为酸性糖肼，主要由天冬氨酸和谷氨酸组成。曼 (Mann, 1983a) 总结了“生物系统中的矿化作用”，讨论了生物晶体生长过程中，生物的结构、空间和化学控制；提出生物矿物相变系列；指出生物矿化作用的三种假设实际上是取向附生的三种机理。

此外，辛普森等 (Simpson, 1981) 主编《生物系统中硅和硅质结构》论文集发表，填补了硅质生物矿化作用空白，基施文克等 (Kirschvink, 1985) 主编《生物中磁铁矿生物矿化作用和磁感性》论文集出版不但阐明了铁质生物矿化作用过程，而且揭示了生物矿物与生物物理现象的密切联系。

这阶段新形成的研究中心，主要有以威尔伯和渡边则光为首的南卡罗来纳大学生物系和电镜中心，以洛温斯坦和基施文克为首的加利福尼亚帕萨迪纳加利福尼亚技术研究所地球和行星科学部，以及由曼领导的牛津大学无机化学实验室。

80 年代末先后出版三本生物矿化作用综合性著作，美国洛温斯坦 (Lowenstam, 1989) 从生物矿物学角度来论述，重点叙述了 6 个门类中现代生物矿化最强烈、研究最详细

的一些例子。英国辛凯斯 (Simkiss, 1989) 从细胞生物学和矿物沉积作用角度论述, 叙述涉及 12 个门类。英国曼 (Mann, 1989) 所主编的一书从化学和生物化学角度论述, 叙述碳酸钙、磷酸钙、二氧化硅和氧化铁等的生物矿化作用、有机基质和生物化学, 并介绍了新技术和新方法, 代表了生物矿物学的主要发展方向。

4. 现期阶段 (80 年代末开始)

虽然洛温斯坦 (1981) 早就提出生物形成矿物的概念, 杨 (1982) 也提出生物矿物 (Biomaterial) 一词, 但当时生物矿物文章限于碳酸盐或磷酸盐, 其他矿物很少, 综合性的生物矿物学文章为数极少, 如杨等 (Young, 1982) 的“生物矿物的结构”, 南科拉斯 (Nancollas, 1982) 的“钙盐沉淀时相变”。随着 80 年代各种微区分析技术的发展, 离子探针、拉曼探针、穆斯堡尔仪, 中子活化仪、核磁和顺磁共振仪的广泛应用, 把生物矿物学研究提高到成因矿物学、元素和同位素地球化学和无机生物化学的水平, 生物矿物问题也引起矿物学家的重视。1987 年 7 月在法国奥尔良举行的第三届应用矿物国际委员会会议, 重点讨论了生物矿物。1989 年 28 届国际地质大会应用矿物组也有一专题, 讨论铁锰生物矿化作用。从 1990 年已举行的第六次和 1993 年底将在摩纳哥举行的第七次国际生物矿化作用讨论会的中心议题来看, 生物矿物学研究已由生物矿物的外部形态深入到内部结构和成分, 并重视其形成过程、成岩演化、系统演化和地史演化。

80 年代后期新技术的广泛应用, 细胞内外, 特别在泡囊内, 各种矿物颗粒不断发现; 有机基质的组分和其分子结构与生物晶体结构相互关系的研究, 把生物矿物学提高到细胞生物学和分子生物学的水平。

戴永定 (1989) 根据大量文献资料, 提出生物矿物体演化的理论, 指出生物矿物演化顺序为由硫化物→氧化物→钙磷酸盐→钙碳酸盐, 生物矿物体结构在点线面体的演化基础上阐明了各种结构类型的相互演化关系; 生矿体类型演化顺序为由生矿粒→生矿簇→骨针→骨片→骨壳或骨骼。这就从理论上推翻生物在寒武纪初才开始突然矿化的观点, 并为研究生物矿物体的早期演化提供了理论依据。

三、各类生物矿物的研究概况

生物矿物以生物钙镁碳酸盐和磷酸盐研究最早, 也最详细, 二氧化硅和铁锰氧化物、氢氧化物次之, 其他矿物研究得较少。

1. 钙镁碳酸盐矿物

早在 50 年代和 60 年代, 美国蔡夫 (Chave, 1954) 和洛温斯坦 (Lowenstam, 1963) 就对无脊椎动物和藻类的钙镁碳酸盐矿物成分, 文石、方解石、镁方解石及其中镁含量, 以及影响矿物成分和镁含量的因素作过广泛的调查研究。70 年代德国里希特和费希鲍尔 (Richter and Füchtbauer, 1978) 综合了推断古代镁方解石的方法, 并提出用铁方解石交代作用推断三叶虫、四射珊瑚和苔藓虫等化石原始为镁方解石生矿体。从 70 年代以来, 美国克伦肖 (Crenshaw, 1972, 1982) 和以色列韦纳 (Weiner, 1983, 1984) 对钙镁碳酸盐矿化作用中有机基质功能和组分进行了研究, 划分出可溶或酸性与不可溶或构架两种组分。80 年代以来, 美国渡边则光 (Watabe, 1981, 1989) 对生物钙镁碳酸盐的矿化作用和晶体生长作了系统的研究和总结。瓦特 (Water, 1985) 对生物碳酸盐溶解时的相对活动性进行了研究。最近, 加拿大莫里森和布兰德 (Morrison, 1986; Brand, 1987) 系统总结了现代和

化石海相无脊椎动物生矿体的生物地球化学,探讨了它们的微量元素和同位素组成。

2. 钙镁磷酸盐矿物

早期有纽曼 (Neuman, 1953, 1958) 对硬骨 (bone) 矿物的相特征和化学动力学研究,阿姆斯特朗 (Armstrong, 1965) 对硬骨矿物的成分和组成的研究,美国麦康奈尔 (Mc Connell, 1963~1973) 对硬骨矿物晶体化学的初步分析,布朗 (Brown, 1966, 1976) 对硬骨矿物晶体生长和化学性质的研究。70年代以来,它们的晶体化学和晶体生长机理得以阐明。扬和布朗 (Young and Brown, 1982) 对生物磷酸盐矿物结构进行过详细研究和总结。南科拉斯 (Nancollas, 1980, 1982, 1984) 对生物钙磷酸盐的晶体生长、相变和结晶化学作过深入的探讨。波斯纳 (Posner, 1980, 1984) 对生物矿化组织,特别是硬骨和软骨的矿物组成和分子结构以及生物大分子的影响进行了长期的研究。勒格罗斯 (LeGeros, 1981, 1984) 一直从事人体和生物系统中钙磷酸盐矿物的合成和鉴定,并对附加离子和分子在生物钙磷酸盐矿物晶体生长和相变过程中的影响作过精辟的分析。以上作者都集中在美国东北部。此外,洛温斯坦 (1972) 和罗兹 (Rhodes, 1971) 对无脊椎动物钙磷酸盐生矿体作过广泛的调查研究。法国希施勒 (Hirscher, 1990) 和卢卡 (Lucas, 1985) 对细菌形成的磷灰石进行过研究。

3. 二氧化硅矿物

美国沃尔卡尼 (Volcani, 1981) 对硅藻,美国哈特曼 (Hartman, 1981) 对硅质海绵,英国麦克罗里 (McGrory, 1981) 对甲藻和金藻,加拿大桑斯特 (Sangster, 1981) 对高等植物都作过系统的硅化作用研究。沃尔卡尼 (1983) 对生物系统的硅化作用作了初步总结。美国赫德 (Hurd, 1983) 对硅质生矿体的物理和化学性质进行了详细的研究。日本饭岛 (Iijima, 1983, 1988)、美国卡斯特纳 (Kastner, 1983) 和威廉斯 (Williams, 1985) 对生物二氧化硅成岩作用矿物相转变进行了广泛的研究。加拿大卡尔弗特 (Calvert, 1983) 深入地讨论了生物硅的来源、沉淀、溶解、保存和相变过程。英国佩里 (Perry, 1989a, 1989b) 对生物成因硅石 (Silica) 的分子结构和有机基质进行了各种分析研究。

4. 铁锰生物矿物

美国洛温斯坦 (Lowenstam, 1967, 1985) 和基施文克 (Kirschvink, 1979, 1985) 对石鳖牙齿和磁性细菌的磁铁矿矿化作用作了深入的研究,英国曼 (Mann) 对细菌磁铁矿 (1984, 1985, 1989) 和蛾牙齿的针铁矿 (1986) 进行了深入的矿物学研究,美国罗宾斯 (Robbins, 1987)、尼尔森 (Nealson, 1978, 1983a, b)、埃利希 (Ehrlich, 1978, 1981) 和索里姆 (Sorem, 1980) 对微生物形成的大洋锰结核中铁锰矿物进行过研究。

5. 硫化物

瑞典哈尔贝里 (Hallberg, 1972) 在硫酸盐还原细菌连续培养中形成九种铁和锌的硫化物。澳大利亚特鲁丁格 (Trudinger, 1976) 研究过细菌成因黄铁矿和其他硫化物。英国曼等 (1990) 在硫细菌,如脱硫弧菌中,发现好几种铁硫化物包体。

四、微生物生物矿物学研究概况

1. 细菌

由于细菌生物矿化作用在消除环境污染和生物成矿成岩方面的重大意义,因而细菌生物矿化作用一直受到人们的青睐。其中应当提到美国布莱克默 (Blackmore, 1975, 1985)、

基施文克 (1980) 和英国曼 (Mann, 1984), 用高分辨率透射电镜和穆斯堡尔仪及核磁共振仪对磁性细菌生物矿化作用的研究; 美国盖奥尔斯 (Ghiorse, 1984)、尼尔森 (Nealson, 1978, 1983a、b) 和埃利希 (Ehrlich, 1981) 等对铁锰细菌矿化作用的研究, 斯托伊德尔 (Steudel, 1989)、维赫瓦奇 (Wichlacz, 1986)、瑞典哈尔伯里 (1972) 和澳大利亚特鲁丁格 (1976) 对硫细菌生物矿化作用的研究, 英国彭特科斯特 (Pentecost, 1986, 1988) 和里丁 (Riding, 1991) 对蓝细菌生物矿化作用的研究。

2. 叠层石

虽然对叠层石的研究已经很多, 但对其矿物成分和显微结构方面研究较少。比利时蒙蒂 (Monty, 1976) 研究了钙质叠层石组构, 曹瑞骥、朱士兴划分过蓟县震旦亚界叠层石 (1979) 的显微结构构造, 斯里兰卡达哈纳亚克 (Dahanayake) 发现了磷质核形石 (1985) 和铁质核形石 (1986) 的微生物结构, 德国克伦宾 (Krumbein, 1986) 探讨了微生物膜中矿物的生物转化, 芬尼 (Pfenning, 1989) 介绍了盐沼中砂—粉砂质菌席的生态微层组合。

3. 藻类

藻类生物矿物学研究开展较晚。最早是美国施马尔茨 (Schmalz, 1965) 对珊瑚藻的镁方解石的镁含量及过量镁的存在形式进行过研究。后来英国博森斯 (Bosence, 1991) 和法国卡拜奥奇 (Cabioch, 1986) 对珊瑚藻生物矿化作用都作过详细阐述。荷兰韦斯布洛克 (Westbroek, 1986) 对颗石藻生物矿化作用作过深入的研究。美国沃尔卡尼 (Volcani, 1981) 和英国克劳福德 (Crawford, 1981, 1986) 对硅藻细胞壁生物矿化作用作过长期的、系统的研究。瑞士普赖锡格 (Preisig, 1986)、英国格林 (Green, 1986) 和英国麦格罗里 (McGrory, 1981) 对金藻硅化作用都作过广泛的研究。澳大利亚博罗维茨卡 (Borowitzka, 1986) 对绿藻, 特别是对仙掌藻 (Halimeda) 生物矿化作用作过仔细观察和深入研究。英国雷文 (Raven, 1986) 和利奇 (Leitch, 1991) 对轮藻生物矿化作用也作过研究。1986 出版的《低等植物和动物的生物矿化作用》一书 (Leadbeater, 1986) 主要内容为藻类生物矿化作用。

4. 原生动物

最早是英国伍德 (Wood, 1949), 接着是美国洛布利克 (Loeblich, 1964) 用生物显微镜对有孔虫壳层结构进行系统研究、分类和总结。澳大利亚格莱斯纳 (Glaessner, 1963) 提出有孔虫壳层结构的演化方向。后来, 美国托 (Towe, 1967) 用透射电镜, 丹麦汉森 (Hansen, 1971, 1972) 用 X 衍射仪和扫描电镜进一步深入研究。汉森 (1979) 对壳层结构演化作了补充。美国赫姆利本 (Hemleben, 1986) 对某些有孔虫钙质壳壁的形成过程进行了透射电镜观察。美国安德森 (Anderson, 1981, 1983, 1986) 对放射虫生矿体结构和生物硅化作用, 二氧化硅与天青石的演化关系进行了研究。

五、无脊椎动物生物矿物学研究概况

1. 海绵动物

虽然研究起步较晚, 但由于牵涉到硅质矿化与钙质矿化的演化关系, 因而愈来愈受到人们的注意。其中, 主要有美国哈特曼 (Hartman, 1981) 和法国加罗纳 (Garrone, 1981) 对硅质海绵生矿体的研究, 英国辛普森 (Simpson, 1985, 1989) 对硅质骨针的轴丝和硅化作用过程的研究, 德国文特 (Wendt, 1979, 1984) 对钙质海绵纲和硬海绵纲矿物成分和显

微结构的研究, 英国琼斯 (Jones, 1984) 和莱杰 (Ledger, 1991) 对钙质骨针的成分和结构的长期研究, 伍德 (Wood, 1991) 对硬海绵生物矿化作用的研究, 德国赛诺巴利—达扬 (Senowbari-Daryan, 1989, 1991) 对串管海绵 (包括矿物成分和显微结构) 的深入研究和系统总结。此外, 琼斯 (1979) 对海绵生矿体显微结构作过总结, 哈特曼 (Hartman, 1980) 和里格比 (Rigby, 1983) 分别对海绵动物生矿体进行过系统总结。

2. 腔肠动物

加拿大斯特恩 (Stearn, 1966, 1977, 1987) 一直从事于层孔虫生矿体结构研究。奥地利芬宁格 (Fenninger, 1974) 等用扫描电镜对现代和古代水螅的生矿体结构进行过研究。我国王鸿祯 (Wang, 1950) 早在 40 年代末就用生物显微镜对四射珊瑚生矿体结构进行过卓越的研究; 近年来又与何心一、陈建强 (1989) 对四射珊瑚和横板珊瑚作了系统的扫描电镜研究和总结。日本加藤诚 (Kato, 1963, 1968) 用偏光显微镜对四射珊瑚和横板珊瑚生矿体结构进行过系统研究; 法国阿洛瓦托 (Alloiteau, 1957) 用生物显微镜对现代六射珊瑚进行过大量素描。他们对所研究的纲或目都有系统总结。美国索劳夫 (Sorauf, 1971~1981), 用附电子探针的扫描电镜对六射珊瑚和四射珊瑚生矿体的结构和矿物成分进行过对比研究, 确定四射珊瑚生矿体的方解石是原生的; 并对腔肠动物的生物矿化作用作了初步总结。八射珊瑚研究较少, 只有丹麦斯皮罗 (Spiro, 1971) 对管珊瑚生矿体的结构和化学成分进行过研究。此外, 澳大利亚的杰尔 (Jell, 1981) 对六射珊瑚的滨珊瑚 *Porites lutea*, 美国范德穆伦 (Vandermeulen, 1973) 对六射珊瑚的鹿角杯形珊瑚 *Pocillopora damicornis*, 邓克尔伯格 (Dunkelberge, 1974) 对八射珊瑚海鳃目的 *Renilla reniformis* 骨针, 美国金斯利 (Kingsley, 1982, 1984) 对八射珊瑚的鳞柳珊瑚 (*Leptogorgia virgulata*) 骨针, 都仔细观察过它们生长过程中生矿体结构变化。

3. 环节动物

其生物矿物学研究很少, 主要有法国博德夫 (Bodeuv, 1989) 对纓鳃虫类化石栖管结构的研究, 布伯 (Bubel, 1983) 对龙介科属种 *Pomatoceras lamarkini* 的栖管和盖板的矿物组成和显微结构研究, 德国内夫 (Neff, 1971) 对龙介科某些种属分泌碳酸钙形成物的显微结构研究, 美国科尔巴思 (Colbath, 1980, 1986) 对矾沙蚕类 (eunicean) 牙齿的矿物和化学组成研究。美国施瓦布 (Schwab, 1966) 用透射电镜对多毛纲牙齿的生矿体结构构造作过研究。

4. 节肢动物

丹麦约恩森 (Jørgensen, 1970) 用透射电镜, 英国巴特 (Bate, 1972, 1975, 1982) 和德国朗格尔 (Langer, 1971, 1973) 用扫描电镜研究介形虫甲壳的显微结构。后来, 西维特 (Siveter, 1987) 和佐恩 (Sohn, 1988) 对丽足目介形虫甲壳的显微结构及其成因作了深入研究。加拿大布尔热 (Bourget, 1977, 1980, 1987) 对蔓足亚纲藤壶生矿体的结构构造和成分进行了详细研究。英国格里纳韦 (Greenaway, 1985) 对甲壳纲的钙平衡和蜕皮过程作过仔细观察和分析。英国达林沃特 (Dalingwater, 1973, 1975, 1977a、b) 和马特维 (Mutvei, 1974, 1981) 用扫描电镜和电子探针对三叶虫表皮和十足目甲壳的显微结构和成分进行过研究。美国菲尔希 (Filshie, 1982) 对昆虫和其他节肢动物表皮的显微结构作了初步总结。此外, 加拿大麦卡利斯特和布兰德 (McAllister and Brand, 1989a) 测定过三叶虫镁方解石的微量元素和同位素, 并根据 Sr/Ca 和 Mg 含量推断其原始含 $MgCO_3$ 量。美国卡多特 (Cadot, 1977) 测定过介形虫甲壳方解石镁含量。