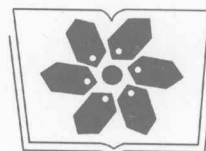


微生物矿化

贾蓉芬 高梅影 彭先芝 陈多福 周怀阳 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

微生物矿化

贾蓉芬 高梅影 周怀阳 等 编著
彭先芝 陈多福

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书简明介绍了生物及微生物矿化的研究历史与未来方向、微生物矿化的基本概念与原理,重点论述:趋磁细菌的生态分布、矿化产物的“智能”意义,菌种及其矿化产物(磁小体)的培养与分离方法;喜铁细菌等微生物在中国黄土(陆相沉积物)中的分布特征,矿化产物的类型、地层磁效应及其地球化学背景;微生物矿化在治理环境污染中的作用与应用前景,尤其对石油类污染物的追踪与微生物降解的实验研究;现代海底微生物矿化成因的冷泉碳酸盐岩的岩石学、地球化学特征及其与天然气水合物的关系;洋底高温热泉极端环境下微生物种群关系及其与生命起源和多金属成矿意义。

本书适于地球科学、微生物学、海洋学、石油与天然气科学和环境科学等专业的大学生、研究生,以及从事相关工作的专业人员和广大科技爱好者阅读或参考。

图书在版编目(CIP)数据

微生物矿化/贾蓉芬,高梅影,彭先芝,陈多福,周怀阳等编著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024434-5

I. 微… II. ①贾…②高…③彭…④陈…⑤周… III. 微生物-矿化作用 IV. Q93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 059123 号

责任编辑:罗 吉 李晶晶/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年5月第一次印刷 印张:22 插页:4

印数:1—1 200 字数:496 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

自然科学史中我所知道的有两次重要的地学与生物学的结合。第一次是 19 世纪初发生的地质学与生物学的宏观层面结合,产生了化石层序或生物地层学,成为全球地层对比的基本手段,并在寻找石油与油源对比等矿藏资源的发现与开采方面起着重要作用;另一次是 20 世纪 70 年代中期开始,通过生物微结构、生物化学和微矿物学的结合,产生了“生物矿化”的研究(文献中称 biomineralization,生物矿化作用,简称生物矿化)。生物矿化研究地球演化过程中生物,特别是微生物的生物矿化过程、矿化产物与矿化效应。它将地球上有活性的生命体与无机矿物相互作用的研究追溯至约 34 亿年前的菌藻类,后延至今天地球表生带微生物活体正在进行的各类矿化作用;观察空间由地球扩展到其他星球,如通过生物矿化现象的比较研究,探索火星的生命。

与大气圈和水圈直接相连的表生带广泛分布着与其环境相适应的微生物群体。它们“就地取食”,夜以继日地工作,制造出结构和功能迥异的各种生物矿物;记录并储存生命起源、生物进化与环境演化的相关信息。《微生物矿化》一书的作者是微生物矿化研究方面一线研究者,是富有探索精神的研究群体。他们依据多年的研究积累和对前人成果的归纳、演绎,系统简明地论述微生物矿化的发展历史、理论基础、研究内容和方法、应用领域和发展方向;分章论述地球表生带不同区域的微生物矿化实例,重点研究中国陆地趋磁细菌及其在黄土-古土壤序列中的地球化学行为与效应、微生物矿化在环境污染与治理中的应用、现代海底冷泉和高温热液喷出口的微生物矿化效应。该书图文并茂,是一本理论紧密联系实际的教学与参考书。我希望它的出版发行将有益于微生物矿化和相关交叉学科的发展,有助于我国资源与环境等领域的可持续发展。

贾蓉芬等作者能够注意到人们尚未完全认识的微生物矿化作用的重要性并出版该书是值得称赞的。虽然该书并不能解决和回答微生物矿化作用的所有问题,但是我很提倡在科研条件并不优越的情况下,具有职业精神的科学家们不畏困难、通力合作,去探索人们所不完全理解的领域,为科学事业做出自己的贡献的精神,这样一种精神值得包括我本人在内的科学界同仁学习,我衷心祝贺该书的出版。



2009 年 2 月

前 言

生物矿化的研究始于1924年,经历了从“钙化”到“生物矿化”概念的更新,研究对象从“古生物”演变到“生物资源与环境效应”,研究的专业队伍从最早的地质古生物学、地质学(含它衍生的多种学科),到目前的生物学、医学、材料学、仿生学,甚至包括军事科学的庞大集团军。当今生物矿化的研究不仅具有重要的理论意义,而且已显现出广泛的应用前景。未来社会的主要能源和资源将要来源于自然界,来源于可再生的生物过程。第二届亚洲地区生物矿化会议的主题是“生物矿化与仿生材料”(中国北京,2004年),第九届“国际生物矿化会议”的主题是“从古生物到材料科学”(智利, Pucon, 2005年)。物理、化学及工程专业人员的加入,使得生物矿化的研究更加数字化、科学化,并能使研究的成果更快地向应用科学转化。

广义的生物矿化是指自地球有生命之日起,生物在矿物形成中所起的作用。生物作为中介把水溶液(包含菌体的体液)中的离子组构成无定形或者结晶的物质,它们可以是简单的固态沉淀物,也可以是具有精美图案结构的复杂矿物群,以适应自然环境和自身的繁衍与进化。微生物是生物中最古老、构造相对最简单、生长周期相对最短的一类“小”生物(微米级),它们具有特异应变功能,能在缺氧、高温、强酸、强碱或贫营养等极端环境下生存。微生物在地球的演化、矿产资源的形成、生命起源和现今人类生存环境净化等方面起着重要作用,甚至是不可替代的作用。对它们物种多样性的调查与功能的深入研究,无疑将有助于对大生物矿化作用的了解,有助于更快地利用微生物矿化的环境效应,有助于更快地实现生命技术产业化和资源的综合利用与持续发展。

本书是作者多年相关研究成果的有机整合,其中包括:①具有趋磁性功能的细菌群在不同生态条件下的生理生化特征、矿化类型与“具有自组装能力”磁小体的应用前景;②中国黄土-古土壤序列(陆相沉积物)的微生物矿化类型与特殊的地球化学背景;③与人类生存密切相关的,微生物矿化作用在环境污染与治理中的应用;④各国政府都十分关注的国际合作研究——海底冷泉活动区的微生物矿化,海底热液环境中的微生物特征与成矿作用。作者在阐述微生物矿化研究成果的同时也介绍了当前国内外同行研究的现状,特别是海底缺氧环境下微生物与矿物间的相互作用,微生物种群间代谢产物相互利用的特征与机理、富氧环境下微生物废物利用的绝妙方式与机理。虽然一些成果是很初步的,但本书的目的是希望得到社会的响应,让微生物矿化在资源与环境领域得到更广、更深层次的研究与应用。需要说明的是本书编写过程也是作者对微生物矿化学习和再认识的过程,而我们总是“知道的比我们需要知道的要少得多”(刘东生,2005),不当之处敬请批评指正。

全书除前言、绪论、跋(执笔人贾蓉芬)外,正文共分七章:第一章执笔人高梅影、刘明朋、刘召明、吴燕;第二章执笔人贾蓉芬;第三章执笔人高梅影;第四章执笔人贾蓉芬、彭先芝、范国昌、李荣森;第五章执笔人彭先芝;第六章执笔人陈多福、冯

东、管红香、宋之光、王翠苹；第七章执笔人王虎、李江涛、包申旭、周怀阳。除上述执笔人外，参加有关研究工作的还有中国科学院广州地球化学研究所刘德汉、李华梅、周正、**王冠鑫**、颜备战（兼南京大学），中国科学院武汉病毒研究所戴顺英，中国矿冶研究院（长沙）罗立群等。中国科学院广州地球化学研究所李肇辉、陈先沛研究员，武汉病毒研究所李荣森研究员，地质与地球物理研究所陈明扬先生分别审阅了本书手稿的部分章节。

致 谢

本书研究得到多个项目的资助：国家自然科学基金项目（编号：40073029、49672136、49291100-4、40472059、40472149、40473032）、中国科学院知识创新工程重要方向项目（编号：KZCX3-SW-224）、广东省自然科学基金（021428）和中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室等资助。

本书出版得到中国科学院出版基金（编号 2005 出版基金办字第 026 号）、中国科学院广州地球化学研究所出版基金资助。

国际第四纪地质学与环境学家安芷生先生为本书作序，矿物学家谢先德先生、有机地球化学博士黄永健为本书的编写提供了重要信息和文献，在编写过程中得到戴永定、阚学敏、邹艳荣等好友的鼓励和帮助，得到家人的支持和理解，在此一并致谢！

緬 懷

在本书即将出版之际，作者非常感谢与緬懷不久前相继离开我们的三位热情支持微生物矿化研究的地质学老前辈：一位是刘东生先生，是他在 1985 年元月，把两块洛川黄土剖面的样品交给正要去英国 Bristol 大学化学系（当时的国际有机地球化学研究中心之一）访问的贾蓉芬，让她利用国外的先进仪器检测黄土中的有机质，并嘱咐要发现新问题，不要泛泛地做。在那里首次检测到代表较干旱环境的饱和烃和与细菌膜有关的脂肪酸等生物标志物，此后开始了中国科学院地球化学研究所与武汉病毒研究所对中国黄土趋磁细菌等微生物矿化的合作研究；一位是叶连俊先生，他将生物成矿作为毕生研究的目标，是我国生物成矿研究的学科带头与领路人；一位是我们的老所长矿床地球化学家涂光炽先生，2006 年春节前他来广州给我们做的最后一次报告是嘱咐大家在寻找矿藏时要重视有机质和热液包裹体的研究。

目 录

序	
前言	
致谢	
缅怀	
绪论	1
一、生物矿化研究的回顾	1
二、生物矿化与生物矿物	4
三、生物矿化的地史演化	7
四、微生物矿化与资源和环境	9
第一章 微生物学概论	16
第一节 微生物学的研究范畴与发展	16
一、微生物学的地位与发展	16
二、微生物学的主要研究内容	19
第二节 微生物的主要类群及其在自然界中的分布	19
一、原核微生物	21
二、真核微生物	29
三、微生物在自然界中的分布	33
第三节 微生物的营养与生长	37
一、微生物对营养的一般要求	38
二、微生物的营养类型	42
三、细胞对营养物质的吸收	43
四、微生物的生长	47
五、环境因子对微生物生长的影响	50
第四节 微生物代谢	56
一、微生物的产能代谢	56
二、微生物细胞物质合成与能量利用	69
三、微生物代谢的调节	73
第五节 微生物矿化作用	78
一、微生物在元素生物地球化学循环中的作用	79
二、微生物的生物矿化作用	84
第二章 微生物矿化机制	88
第一节 晶体成核与生长的物理化学规则	88
一、结晶成核作用的热力学驱动力	89

二、界面自由能与临界半径	89
三、过饱和度与成核速率	91
四、成核途径与 Ostwald-Lussac 相变说	91
五、成核形状	92
六、生物矿物与非生物矿物	93
第二节 生物大分子在微生物矿化中的作用	95
一、微生物大分子的主要元素组成与特殊的功能团组合	95
二、生物大分子与水的作用	101
三、生物大分子对矿化产物的控制	104
四、生物矿化的保真性及其产物的归宿	110
第三节 微生物矿化方式与微生物在铁循环中的作用	112
一、微生物矿化的两种方式	112
二、厌氧环境下微生物对铁的氧化还原途径	119
三、微生物矿化的强度表征	124
第三章 趋磁细菌的矿化与应用	130
第一节 趋磁细菌的发现及几株典型的纯培养菌株	130
一、趋磁细菌的发现	130
二、水域中的趋磁细菌	131
三、陆地沉积物中趋磁细菌	135
第二节 趋磁细菌的生态分布及其分离与培养	136
一、趋磁细菌在自然界的生态分布	136
二、趋磁细菌的分离与培养	139
第三节 趋磁细菌的主要生物学和生理生化特征及其遗传进化与分类	148
一、趋磁细菌的主要形态学、生物学特征和生理生化特性	148
二、趋磁细菌的遗传进化与分类	155
第四节 趋磁细菌的生物矿化作用	157
一、趋磁细菌的生物地球化学重要性	157
二、趋磁细菌的生物矿化作用	157
第五节 趋磁细菌中磁小体形成的分子机理	166
一、磁小体的主要特征和组成成分	166
二、与磁小体合成有关的蛋白质家族及其编码基因	169
三、磁小体形成的分子机理	172
四、趋磁细菌及其磁小体的应用	174
第四章 中国黄土微生物矿化作用与矿化环境	178
第一节 中国黄土的沉降特征与研究意义	178
一、世界黄土分布的主要特点	178
二、中国黄土分布的特点	180
三、中国黄土的分层与地层对比	182
四、中国黄土在全球变化研究中的作用	188

第二节 中国黄土微生物生物量估计与生物标志物	190
一、干旱、半干旱地区微生物生物量估计	190
二、中国黄土有机碳的分布及一种与微生物活动有关的热解烃	194
三、中国黄土中的生物标志物	197
第三节 异化金属还原菌利用 Fe^{3+} 的途径与速率	204
一、异化金属还原菌的功能与意义	204
二、异化金属还原菌分泌的铁载体及其类型	206
三、铁载体促进 $\text{Fe}(\text{III})$ 从矿物释放的有效性 with 速率	213
第四节 中国黄土中的铁细菌和趋磁细菌	219
一、中国黄土中铁细菌的类型与分布	219
二、中国黄土趋磁细菌的特征与分布	221
三、中国黄土中铁细菌与趋磁细菌矿化类型	223
第五节 趋磁细菌提高古土壤磁化率的实验研究	227
一、富集培养实验	228
二、生长培养实验	228
三、实验结果	228
四、趋磁细菌提高古土壤磁化率的条件	230
第六节 中国黄土微生物矿化的地球化学证据与环境	232
一、MB 生长实验前后铁的价态变化	232
二、中国黄土磁性矿物及其组合特征	233
三、磁性矿物及微生物矿化现象的原位观察	238
四、中国黄土的微生物矿化类型与地球化学背景	239
第五章 微生物矿化作用在环境污染与治理中的应用	243
一、石油类污染物的微生物矿化	243
二、环境中原油类污染的稳定同位素指纹	246
三、微生物对其他有机污染物的矿化作用	250
四、微生物矿化在环境污染处理中的应用及前景	251
第六章 海底冷泉渗漏活动区的微生物矿化	252
第一节 冷泉系统与微生物作用	252
一、冷泉的概念	252
二、冷泉渗漏活动区的甲烷缺氧氧化作用与微生物	254
第二节 冷泉渗漏活动区微生物活动的生物标志化合物	259
一、生物标志化合物分析与鉴定方法	259
二、生物标志化合物	259
第三节 冷泉碳酸盐岩	264
一、冷泉碳酸盐岩的沉积岩石学特征	264
二、冷泉碳酸盐岩的地球化学特征	267
三、冷泉碳酸盐岩的沉积作用与控制因素	269
四、南海北部的冷泉碳酸盐岩	271

五、墨西哥湾的冷泉碳酸盐岩	277
第四节 冷泉系统微生物作用及冷泉碳酸盐岩	284
第七章 海底热液环境中微生物的特征和成矿作用	287
第一节 海底热液系统的特征和演化	287
一、海底热液系统的基本特征及其物理化学制约	287
二、热液多金属硫化物矿床及其空间变化	291
三、热液系统中微生物的主要种类及其进化简述	296
第二节 产甲烷古生菌及其生物地球化学作用	297
一、产甲烷古生菌的多样性	297
二、产甲烷古生菌的代谢途径和产甲烷机制	297
三、产甲烷古生菌的矿物/化学制约	300
第三节 微生物对热液和硫循环的作用	301
一、热液微生物矿化	301
二、硫酸盐还原菌和硫还原菌及其矿化作用	302
三、硫氧化细菌及其氧化作用	305
四、微生物对热液硫循环作用的研究	306
参考文献	308
跋	332
图版	

绪 论

一、生物矿化研究的回顾

我国生物学界通常对生物采用六界分类法,即病毒界、原核生物界(包括细菌与蓝藻)、真核原生生物界(包括大多数藻类与原生动物)、真菌界(包括酵母菌与霉菌等)、植物界与动物界。微生物学的研究对象在生物分类系统中十分庞杂,包括不具细胞结构的病毒,单细胞的细菌、放线菌,属于真菌的酵母菌与霉菌,单细胞藻类、原生动物等(武汉大学、复旦大学生物系微生物教研室,1979)[以下简称(微生物学,1979)]。微生物个体微小,以原核细菌为例,其直径一般在 $1\mu\text{m}$ 左右,要在显微镜及电子显微镜下才能被观察到。由于它普遍存在结构简单、易于培养、世代更新快等特点,近几十年来“微生物”已被作为地质学、化学和物理学等学科的研究对象。在专门研究微生物矿化之前有必要先回顾一下包括大生物矿化在内的,生物矿化研究总体进展概况。

(一) 生物矿化研究的初始阶段

因珍珠养殖业的需要,德国学者施密特(Schmidt, 1924年),用显微镜对双壳类及各种硬组织进行了系统的观察,编写了第一本生物矿化专著《偏光显微镜下动物壳的组成》,开创了“生物矿化”的研究。

(二) 从“钙化”到“生物矿化”

20世纪50年代到80年代早期,碳酸盐岩地区发现了大油气田,随之而形成的在碳酸盐岩地区找油找气的热潮大大促进了碳酸盐岩相中的生物矿化研究,一时间“钙化”几乎成为生物矿化的代表,反映了以含钙矿物为主体的生物矿化认识阶段。随后越来越多的生物成因矿物的发现,促使人们除了研究钙以外还研究了其他阳离子,以及全部由生物大分子组成的生物矿物,从而“生物矿化”替代了“钙化”一词。一系列的文献和教科书记载了这方面的研究成果,如《论生物矿化》(Lowenstam and Weiner, 1989),《生物矿化:细胞生物学与矿物沉淀》(Simkiss and Wilbur, 1989),《生物矿化:生物的无机物质化学原理与概念》(Mann, 2001),《地质勘探中生物的金属聚集与生物矿化》(Westbrock, 1983),《低等植物和动物中的生物矿化》(Leadbeater and Riding, 1986),《植物和动物中生物矿化的起始、演化和方向》(Crick, 1989),《生物矿化》(Bäuerlein, 2000; Weiner and Dove, 2003)。值得一提的是美国矿物学会及地球化学学会分别在1997年和2003年的年会上聘请与生物矿化研究有关的著名专家,以特邀报告的方式综述生物矿化研究的新进展,并分别出版了《微生物与矿物的相互作用》(Banfield and Nealson, 1997)和《生物矿化》(Dove et al., 2003)丛书。无疑,这

些专著对生物矿化的普及与研究起了重要的推动作用。

(三) 从“古生物或活生物”到“生物材料”、“生物资源”

用现代科技研究已灭绝的三叶虫的眼睛化石,发现它是由六方方解石单晶组成,这种方解石具有双倍反射白光的能力,从而推测三叶虫有双倍的视力,有利于它们在黑暗海底的底栖生活。蜘蛛用 $180\mu\text{g}$ 的丝心蛋白张开成 100cm^2 的网络捕捉飞虫,它通过蜘蛛网的刚度、强度和延伸能力的巧妙平衡,把撞网飞虫的冲击能分散到大片面积上,使作用于蜘蛛网上的约 70% 的冲击力通过黏弹性拉伸过程发热耗散掉,从而避免了网破或捕捉物被反弹出去。蜘蛛产出的蜘蛛网显示的材料高效利用令人叹服。趋磁细菌能在菌体内的生物膜上生长出无机磁性矿物,将其自组装成磁性矿物链。生物矿物的上述独特性能给人们重要的启示,它为医学材料和军事材料的研制带来思维方式的革新,如在人体组织缺损处植入可吸收的生物大分子(如胶原体和几丁质)框架材料,人体活细胞在框架内逐渐生长出被缺损的组织,同时框架材料逐渐降解或被吸收(崔福斋和冯庆玲,2004)。框架材料的研制,在很大程度上促进了生物矿化与生物材料的互动研究。喜铁菌、硫酸盐还原菌、脱氮硫杆菌等细菌群能不断地从大洋深水中形成铁锰等多金属结核(阎葆瑞,1994)。与冷泉有关的深海区和陆地冻土带存在的天然气水合物,经微生物作用形成的甲烷气在低温条件下可形成大规模的气藏,被认为是未来理想的清洁能源。对中美洲海底-450m 的含水合物样本中采集到的微生物进行 DNA 分析后,已鉴定出 348 种具类似碱基序列的新型微生物群(天然气水合物信息网,2006/3/8)。微生物与矿藏资源的关系不仅引起地质学家的兴趣,而且也得到各国政府的关注。

(四) “学科互融”与“国际合作”

国际生物矿化研讨会为各国致力于生物矿化研究的学者提供了专门交流的平台与场所。每一届会议的主题也是生物矿化研究进展的里程碑。1970 年德国波恩大学的 H. K. Erben 教授主持了第一届国际生物矿化会议并商定该会议每隔 3 年或 4 年召开一次。由 Omori Masae 教授(日本)和戴永定教授(中国)倡议、日本的化石研究会主办,1998 年在北京中国科学院古脊椎动物与古人类研究所召开了第一届亚洲地区生物矿化研讨会。2004 年中国清华大学崔福斋教授等主持了第二届亚洲地区生物矿化研讨会。表 0.1 列出了历届国际及亚洲地区生物矿化研讨会的简况,此外在国际地质学、矿物学、环境学等学科的刊物和会议上也有不少有关生物矿化研究的报道与报告。

表 0.1 历届国际和亚洲地区生物矿化会议简介

届次	时间	地点	主题	出版物与主编
国际				
I	1970	德国 Mainz	生物硬组织的矿化机理	《生物矿化作用》(Zipkin, 1973)
II	1974	美国南卡罗来纳 Georgetown		《无脊椎动物和植物的矿化机理》 (Watabe, 1976)
III	1977	日本三重县 Kashokijima		《动植物生物矿化机理》(Omori, 1980)
IV	1982	荷兰 Renesse		《生物矿化和生物的金属聚集》(Westbrock, 1983)
V	1986	美国得克萨斯 Arlington		《动植物生物矿化的起源、演化和现代概况》(Crick, 1989)
VI	1990	日本东京 Odawara		《生物系统中矿化的机理和种系发生》 (Suga and Nakahara, 1991)
VII	1993	摩纳哥 Monaco	有机大分子与矿物晶体结构的相互关系	
VIII	2001	日本 Niigata		
IX	2005	智利 Pucon	从古生物到材料科学	
亚洲				
I (亚洲)	1998	中国北京: 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	生物矿物和硬组织	《生物矿物和硬组织》 (Kobayashi and Dai, 2003)
II	2004	中国北京: 清华大学	生物矿化与仿生材料	材料科学与工程 C 辑, 2006, Vol. 26

从最近的第九届国际生物矿化研讨会的主题、报告内容与人员的组成来看, 一个突出的特点是生物矿化已不再是一种纯学术研究, 而是与人们的生活紧密相连的、具有广泛潜在应用的科学研究, 如在提交的 107 篇摘要中与人类的牙齿和骨骼矿化有关的有 18 篇, 占 17%; 与人类的化妆品和食物相关的贝类(软体动物)矿化有关的 31 篇, 占 29%。另一个特点是生物矿化的研究现在已不再仅限于古生物学和地质-地球化学学科, 已发展成为多种学科组成“集团军”研究的新局面(岩石, 2006)。会议摘要显示 63% 的成果是由两个或两个以上单位合作研究取得的, 有五项目成果是由五个单位合作取得的, 其中的两个报告竟是由三个国家五个实验室共同完成的, 如“论制造文石和方解石的软体动物的构造”是由以色列科技大学材料工程系、法国欧共体同步辐射反应堆、美国 Argonne 国家实验室现代光子源 X 射线应用与研究、以色列核研究中心物理系、法国勃艮第大学生物地质科学实验室共同研究的; “球形趋磁细菌中磁小体的结晶习性与磁铁矿结构”是由巴西里约热内卢大学微生物、生物制药研究所与美国亚利桑那州立大学的固态科学研究中心、地球化学-生物化学系和美国加州大学物理系合作研究的。多学科加入, 特别是材料与工程专业人员的加入, 给生物矿化研究带来了新思想和新技术, 如矿物从无定形到有晶形的发展被称为是“先浇铸再凝结”的新概念。当前生物矿化的研究除了采用较为传统的生物学、地球化学、医学等手段外, 还采用了现代多种分析与观测手段, 如张力调节显微镜、D/MAX-Ar 转靶 X 射线衍射仪、同步加速器、计算机模拟、试管模拟、⁹⁹Tc 同位素标记及 DNA 基因测定与克隆等技术, 这些对生物矿化研究的深入和应用前景的扩大具有重要意义。

二、生物矿化与生物矿物

(一) “生物矿化”概念

不同专业的科学家从不同角度研究“生物矿化”(或生物矿化作用, biomineralization), 因而对“生物矿化”一词的理解具有多方位的含义。

岩石矿物学家认为生物矿化是在生物体的不同部位, 以各种矿化作用方式, 经历了核化、生长和相变等过程, 并受到生物对矿物成分、空间和结构控制, 形成的生物矿物集合体(戴永定等, 1994)。

材料学家感兴趣的是生物矿化提供了一个材料设计的典范, 像骨、牙、壳这类材料作为复杂的化合物, 其结构和界面选择了适合其功能的最佳设计, 模拟这种结构设计将会使人们朝着“智能材料”设计方向前进一大步(崔福斋和冯庆玲, 2004)。

地球化学家认为生物矿化是将生物中的软组织(在组成上类似于大气圈和海洋的水圈), 与固体地球中硬的物质联系起来。当生物体活着时, 它造就了生物体的骨骼或硬壳, 生物体死亡后, 生物体的骨骼或硬壳被当作沉积物埋藏在河流的冲积平原或深海的海底。正是这些生物中硬的、耐磨、耐腐蚀的部分成为地球化石记录的主要部分(Leadbeater and Riding, 1986; 转引自 Weiner and Dove, 2003)。

微生物学家认为微生物在好气区可以把有机质完全矿化为无机的 CO_2 , 在缺氧区有机质部分被矿化, 在释放 CO_2 的同时, 形成腐殖质进入沉积物。在生物的能量流及食物链中, 由于生物的呼吸代谢, 随着碳的迁移转化, 逐级释放能量, 生物本身的能量利用率一般仅为 10% 左右, 90% 的能量作为呼吸热散发到周围的环境中, 为沉积物中的化学反应提供能量(王大珍, 1983)。表 0.2 表达了不同生态微生物的矿化方式, 产生的能量与消耗的分配比。图 0.1 显示呼吸链及 ATP(腺苷三磷酸, 详见第二章)的能量合成与释放的部位。

表 0.2 不同呼吸类型微生物产能与消耗的分配

呼吸(代谢)类型	好氧呼吸	无氧的硝酸盐还原呼吸	无氧的硫酸盐还原呼吸	无氧的发酵*
最终电子受体	O_2	NO_3^-	SO_4^{2-}	有机物*
简化的总反应式	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \longrightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$5\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 24\text{NO}_3^- + 24\text{H}^+ \longrightarrow 30\text{CO}_2 + 12\text{N}_2 + 42\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 3\text{SO}_4^{2-} + 6\text{H}^+ \longrightarrow 6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{S} + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{ADP} + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COCOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{ATP}^*$
C:O 或 C:N 或 C:S	6C:6O	5C:4N	6C:3S	
氧化速度/[μg 分子/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)]	34 (氧的吸收速度)	0.5~1 (脱氮速度)	9.5 (SO_4^{2-} 还原速度)	
换算为碳的氧化 速度/[μg 分子/ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)]	34	1	19	

续表

呼吸（代谢）类型	好氧呼吸	无氧的硝酸盐还原呼吸	无氧的硫酸盐还原呼吸	无氧的发酵*
菌体生存耗氧量 (C、N、S的 直接氧化)	34/34, 总矿化的 38%用于好气菌的 呼吸 (CO_2 生成), 50%供 H_2S 的化学 氧化, 12%供 NH_4^+ 的氧化	1/34, 总矿化的 3%为 还原 NO_3^- 菌脱氮过程 中的耗氧量并同时形 成 N_2 。但在蛋白质降 解的同时还产生 NH_4^+	19/34, 总矿化的 56% 由硫酸盐还原菌对有 机碎屑的矿化并同时 形成 H_2S 。 H_2S 中 10%得以保存, 90% 被化学氧化	
净合成能量 /分子 ATP	38*	有, 较小, 难测量	有, 较小, 难测量	2*

* 引自微生物学, 1979。

资料来源: Jørgensen, 1980. Limfjorden 海湾沉积物中微生物对有机质矿化的测定与计算, 转引自王大珍, 1983。

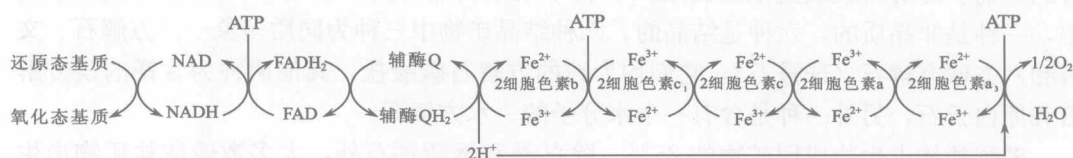


图 0.1 呼吸链示意图 (微生物学, 1979)

自然界中 99% 以上的碳储存在没有生命的煤、石油及碳酸盐等沉积物中。尽管陆地或水域沉积了大量的生物遗体及有机碎屑, 活的生物体仅占碳储存的 1% 左右, 然而正是这类活的生物, 尤其是微生物的矿化主导着全球的碳循环。在生命的代谢过程中, 包含能量集聚的同化作用与能量释放的矿化作用, 形成了许多与生命活动有关的矿物, 包括无机矿物和有机矿物。它们正在被人们发现和重视。

由上所述, 当前对生物矿化的认识已从比较直观的“生物矿化过程就是生物形成矿物的成核、结晶和生长的过程”发展到对生物矿化功能的认识。因而, 完整的生物矿化研究应包含三个方面, 即调查研究活着的生物营造硬组织的机理与过程、结构与功能及其与环境演化的关系; 从死亡生物, 特别是已灭绝的生物的硬组织结构与矿物组成中解读其生成机理、功能及环境的信息; 用生物化学实验、地球化学实验模拟与复制的方法对所获结果和认识进行验证。通过这些研究, 不断深化对生物矿化的认识, 提高人们利用和仿真生物矿化的能力, 并为生命起源与环境演化的关系提供实验和理论依据。因此, 当前它已成为生物学、化学、地质学、地球化学、古生物学、考古学、医学、生态环境学、生物灵感材料学、仿生工程学、天体学等学科共同关注的一门交叉学科, 也是人类认识地球及其演化, 生命起源和提高人类物质文明生活的切入点。

(二) 生物矿物 (biomineral) 及其主要类型

生物矿物是生物矿化的一种可见的最终产物, 它是指在生物控制条件下形成的一种矿物相, 如在形状、大小、结晶度、结晶位置与方向、同位素和微量元素的组成等方面, 具有与非生物矿物不一样的特点。其中两个最引人注目的特点, 一是生物矿物的复