

目 录

前 言

第一章 论生物有机质成矿	(1)
一、对生物有机质成矿的认识过程和立项经过	(1)
二、生物有机质成矿作用的标志、过程、环境和背景	(3)
三、生物有机质成矿(矿层)的“事件性”规律	(29)
四、生物有机质成矿的预测问题	(36)
五、结束语	(39)
第二章 生物与有机质成矿作用的生物标志物 and 同位素地质标志	(43)
一、生物标志物	(43)
二、稳定同位素	(53)
第三章 生物有机质成矿作用的实验研究	(75)
一、概述	(75)
二、生物有机质成矿的实验方法、内容和结果	(77)
三、藻类、菌类及其有机质成矿的方式和途径	(78)
四、主要结论	(83)
第四章 冀西北宣龙地区中元古界铁质叠层石及其微生物化石	(85)
一、铁质叠层石的空间展布	(86)
二、铁质叠层石的基本类型和形态特征	(87)
三、铁质叠层石中的微生物化石	(88)
四、小结	(90)
第五章 上扬子及邻区震旦纪、早寒武世的微生物群	(93)
一、震旦纪、早寒武世微生物化石类型	(93)
二、微生物群落及其含矿地层分布	(96)
三、微生物成矿作用的讨论	(98)
第六章 上扬子及邻区震旦纪和寒武纪的含磷岩系	(105)
一、概述	(105)
二、含磷岩系的基本类型及形成环境	(105)
三、含磷岩系的时空展布	(110)
四、生物有机质的成磷作用与含磷岩系的沉积分带	(115)

第七章 扬子区震旦纪-寒武纪古地理环境与生物成矿作用	(121)
一、沉积类型及分布	(122)
二、生物类型及分布	(130)
三、古地理环境	(132)
四、古气候分析	(137)
五、关于生物成矿作用问题	(141)
第八章 扬子地台及邻区的含矿建造(层)及生物成矿作用	(145)
一、引言	(145)
二、典型含矿建造(层)及生物成矿作用	(149)
三、富含有机质硅、泥岩建造(层)	(160)
四、小结	(173)
第九章 磷块岩矿床的生物有机质成矿作用	(175)
一、黔中磷块岩的成矿地质背景	(175)
二、含磷岩系和磷块岩的有机质	(184)
三、菌藻类微生物与磷的富集	(186)
四、微量元素基本特征及其成因意义	(193)
五、稀土元素基本特征及其成因意义	(205)
六、同位素组成及其成因意义	(214)
七、生物有机质的成磷作用	(219)
第十章 黑色岩系型碳酸锰矿床微生物成矿作用	(225)
一、概述	(225)
二、瓦房子铁锰矿床的碳酸锰矿石相	(226)
三、民乐、大塘坡碳酸锰矿床	(230)
四、高燕碳酸锰矿床	(233)
五、桃江碳酸锰矿床	(242)
六、大瓦山锰矿床和轿顶山钴-锰矿床	(245)
七、总结	(253)
第十一章 赤铁矿矿床形成中的生物作用	(263)
一、成矿地质背景	(263)
二、地球化学元素特征	(267)
三、铁矿石中的有机碳与生物标志物	(274)
四、宣龙铁矿的生物成矿作用	(280)

第十二章 有机质在铅锌矿形成中的作用	(285)
一、Sedex 铅锌矿床	(285)
二、MVT 铅锌矿床	(297)
三、两类铅锌矿床的有机成矿作用比较	(309)
第十三章 微细粒侵染型金矿形成中的生物有机质作用	(311)
一、矿床地质背景及矿床地质特征	(312)
二、矿源层的形成: 生物有机质的预富集作用	(314)
三、成矿过程中的有机质作用: 有机岩石学研究	(322)
四、成矿过程中的有机质作用: 有机地球化学研究	(325)
五、成矿过程中的有机质因素及作用分析	(331)
第十四章 重晶石、毒重石沉积的生物有机质作用及古海洋环境	(335)
一、中国南方早寒武世重晶石、毒重石成矿带的空间展布特征	(335)
二、重晶石沉积: 海洋生物生产率的标志	(339)
三、重晶石、毒重石形成的氧化还原条件	(341)
四、钡的来源与大地构造环境解释	(346)
第十五章 近代天然碱矿床的生物成矿作用	(353)
一、现代盐碱化环境(以碱湖为主)的生物与生态体系	(354)
二、内蒙古合同察汗淖碱湖沉积环境与生物成碱作用的机理	(357)
三、中国老第三纪天然碱矿床生物成矿作用的若干证据	(376)
四、主要结论(附碱湖环境实施生物工程的跋义)	(383)
第十六章 藻类对成矿元素富集条件的实验研究	(385)
一、藻类富集磷的模拟实验	(385)
二、藻类富集铁的模拟实验	(388)
三、藻类富集铜的模拟实验	(393)
四、藻类富集锰的模拟实验	(399)
第十七章 现代盐田人工藻席发育特征及其成盐意义	(405)
一、研究方法	(406)
二、结果	(407)
三、关于藻席成矿作用的讨论	(413)
第十八章 有机质对铅锌元素迁移富集条件的实验研究	(417)
一、概述	(417)
二、腐殖酸与铅锌元素相互作用的模拟实验研究	(419)

三、油田卤水与成矿溶液	(420)
四、金属-有机络合物热稳定性研究	(421)
五、原油中金属元素丰度	(422)
六、金属元素在原油/水溶液相之比中的分配特征的实验研究	(423)
七、油气生成和初次运移与金属元素活化、迁移和富集作用的实验研究	(426)
八、有机质在矿物沉淀中的作用	(427)
第十九章 微生物对金富集作用的实验研究	(429)
一、细菌参与载金硫化矿氧化作用使金富集	(429)
二、真菌对金的吸附作用使金积聚	(434)
第二十章 总结	(439)
主要参考文献	(443)

图版

Contents

Foreword

Chapter 1	Considerations on biomineralization	(1)
1-1	Reflections of the history of our gradual approach to the understanding on biomineralization and its final drawing-up of our present project	(1)
1-2	Episodic genetic processes, their criteria, and relevant sedimentary environment and geological background	(3)
1-3	The eventual nature of metallogenic process	(29)
1-4	Prediction of biomineralization	(36)
1-5	Concluding remarks	(39)
Chapter 2	Bio-markers and isotopic markers	(43)
2-1	Bio-markers	(43)
2-2	Isotopic markers.....	(53)
Chapter 3	Experiments for biomineralization	(75)
3-1	Foreword	(75)
3-2	Contents, methods, and results.....	(77)
3-3	Roles of algae, bacteria, and organic matter in the mineralization	(78)
3-4	Concluding remarks	(83)
Chapter 4	The Middle Proterozoic Ferruginous stromatolites and their constitutional algae fossils of the Xuanlong iron deposit, NW Hebei province	(85)
4-1	Spatial variation of the Ferruginous stromatolite	(86)
4-2	Morphological characteristics of the different species of the Ferruginous stromatolites	(87)
4-3	Microbial differences of the Ferruginous stromatolites	(88)
4-4	Concluding remarks	(90)
Chapter 5	Sinian and Cambrian microbial fossils of the Upper Yangzi valley and adjacent area	(93)
5-1	Types of Sinian and Cambrian microbial fossils.....	(93)
5-2	Basic taxonomical difference of the Cambrian stromatolites	(96)
5-3	Discussion of the metallogenic processes of the different microbial biota	(98)

Chapter 6	Phosphorite bearing sedimentary series of the Sinian and Cambrian of the Upper Yangzi valley and adjacent area	(105)
6-1	General considerations	(105)
6-2	Characteristic types of the phosphorite-bearing series and their sedimentary environment	(105)
6-3	Spatial and temporal difference of phosphorite-bearing series	(110)
6-4	Facies differentiation of the phosphoritization of phosphorite-bearing series	(115)
Chapter 7	Bio- and organic matter-mineralization and their relevant paleogeographical environment of the Sinian-Cambrian of the upper Yangzi Valley	(121)
7-1	Sedimentary types and spatial distribution	(122)
7-2	Biological communities and distribution	(130)
7-3	Paleogeographic environment	(132)
7-4	Paleoclimatical conditions	(137)
7-5	Problems regarding biomineralization	(141)
Chapter 8	Biomineralization of the ore-bearing sedimentary associations of the upper Yangzi Valley and surrounding area	(145)
8-1	Introduction	(145)
8-2	Biomineralization of typical ore-bearing sedimentary associations	(149)
8-3	Sapropelic siliceous and argillaceous ore-bearing associations	(160)
8-4	Conclusion	(173)
Chapter 9	Phosphoritization of bio- and organic matter	(175)
9-1	Geological background of the phosphoritization of central Guizhou province	(175)
9-2	Microbial and organic matter constituents of the phosphorite-bearing series	(184)
9-3	The enrichment of phosphorous by microbes and algae	(186)
9-4	Chemical characteristics and their metallogenic importance of trace elements	(193)
9-5	Implications on phosphorite genesis of rare-earth elements	(205)
9-6	stable isotopic composition	(214)
9-7	Role of microbes and organic matters on phosphorite generation	(219)
Chapter 10	Microbial mineralization of Mn-carbonate of the black shale ore-bearing series	(225)

10-1	Outline.....	(225)
10-2	Facies of Mn-carbonate of the Wafangzi ferrous Mn-carbonate deposits	(226)
10-3	Minle and Datangpo Mn-carbonate deposit	(230)
10-4	Gaoyan Mn-carbonate deposit	(233)
10-5	Taojiang Mn-carbonate deposit	(242)
10-6	Dawashan Mn-carbonate deposit and Jiaodingshan Co-Mn deposits	(245)
10-7	Conclusion	(253)
Chapter 11	Biomining of sedimentary hematite deposit	(263)
11-1	Geological background	(263)
11-2	Chemical characteristics of the ore-forming elements	(267)
11-3	Organic carbon and biomarkers of the hematite ores	(274)
11-4	Biomining of the Xuanlong hematite ores	(280)
Chapter 12	The role of organic matter on the formation of Pb-Zn ore deposit ...	(285)
12-1	Sedex Pb-Zn deposits	(285)
12-2	MVT Pb-Zn deposits	(297)
12-3	Comparison of the bio- and organic matter mineralization between the two ascribed Pb-Zn deposits	(309)
Chapter 13	Microbial and organic matter processes in the formation of the Carlin-type gold deposit	(311)
13-1	Geological setting	(312)
13-2	Deposition of the source bed: the biological concentration and enrichment of the ore-forming elements.....	(314)
13-3	Role of organic matter during mineralization: evidence from organic petrology	(322)
13-4	Role of organic matter during mineralization: evidence from organic geochemistry.....	(325)
13-5	Function of the organic matter factor in biomining	(331)
Chapter 14	Metallogeny of barite witherite deposits, role of organisms and organic matter, and paleo-oceanographic environments	(335)
14-1	Distribution of early Cambrian barite and witherite mineralization zones in southern China	(335)
14-2	Barite deposition: a symptom of high productivity of microbes	(339)
14-3	Redox potential during the formation of barite and witherite	(341)

14-4	Source of barium as an explanation of the tectonic environment	(346)
Chapter 15	Biom mineralization process of recent trona deposits	(353)
15-1	Organism and ecological system in present saline environments (soda lakes)	(354)
15-2	Sedimentary environments in the lake Hetongchahannor of Inner Mongolia and biological mechanism of trona formation	(357)
15-3	Evidences on biom mineralization of trona from the ancient Tertiary in China	(376)
15-4	Conclusion	(383)
Chapter 16	Simulation test of alga actions on concentrating chemical elements ...	(385)
16-1	Simulation test of concentrating P by alga	(385)
16-2	Simulation test of concentrating Fe by alga	(388)
16-3	Simulation test of concentrating Cu by alga	(393)
16-4	Simulation test of concentrating Mn by alga	(399)
Chapter 17	The developing features and the salifical significance of the artificial alga mat in current salina	(405)
17-1	Method	(406)
17-2	Result	(407)
17-3	Discussion on the alga mat mineralization	(413)
Chapter 18	The experimental study on the role of organic matter in the migration and concentrational conditions of lead and zinc	(417)
18-1	Outline	(417)
18-2	Simulation test on the interaction of humic acid and lead-zinc	(419)
18-3	Oil-field brine as ore-forming solution	(420)
18-4	The thermal-stability of metal-organic complex	(421)
18-5	Metallic element abundance of crude oil	(422)
18-6	Partition of some metallic elements in the phases of crude oil and aqueous solution	(423)
18-7	Generation and primary migration of the petroleum and the activation, migration, and concentration of some metallic elements	(426)
18-8	The role of organic matter in mineral precipitation	(427)
Chapter 19	A simulation test of the microbial concentration of Au	(429)
19-1	Oxidation and concentration of gold through microbial action	(429)
19-2	The adsorption of gold by fungi	(434)

Chapter 20	Summary and conclusion	(439)
References		(443)
Plates		

第一章 论生物有机质成矿*

生物有机质成矿研究符合当前国际地质科学前进的趋势，顺应当前社会发展的需要。课题组经过 4 年多来的协同努力，通过大量的考察、测试、鉴定，模拟与思维综合，取得了预期的成果，提出了一些新的见解。本章将依次论述下列五个方面的问题：

- 一、对生物有机质成矿作用的认识过程和立项经过
- 二、生物有机质成矿作用的标志、过程、环境和背景
 - (一) 生物有机质成矿的物质基础标志
 - (二) 生物有机质成矿的环境和背景标志
 1. 边界效应
 2. 沉积间断效应
 3. 含矿岩系的层序定位
- 三、生物有机质成矿（矿层）的事件性规律
- 四、生物有机质成矿的预测问题
- 五、结束语

一、对生物有机质成矿的认识过程和立项经过

1952 年我所沉积研究室建立伊始，由于当时对矿物资源、能源的急需，即把主要力量集中到资源、能源的调查、研究和理论工作。最初是从锰、铁、磷及石油工作开始的，后来又扩展到铀、铅-锌、金、铝土矿等方面的工作。

通过 40 余年的努力，使我们认识到表生带成矿物质的分异与集中，均可从表生带的三大地质作用，即生物作用、物理作用和化学作用通过地质构造相、域的组构去理解。物质，包括地壳物质，总是在运动着的，总是依据地史的时、空条件而演化变革着的。因而，对生物、有机质成矿研究，就需要紧紧抓住其“物质基础”和“时空背景”，即矿床形成的沉积环境与地质背景这两个方面的核心问题来由表及里地进行追溯。

表生带物质运动，是由岩石圈、水圈、大气圈和生物有机质的演化变革来体现的。沉积矿产的形成，是这 4 个圈层的物质与能量交换形成的。表生带三大地质作用，就必定包括生物作用、物理作用和化学作用，三者缺一不可。但在 80 年代中期以前，地质矿床工作者在讨论成矿作用问题时，却总是忽略了生物作用问题。从而使不少问题得不到完整的解决。在我国情况也大体如此，因而当前我们应当，甚至需要大力提倡对生物有机质成矿问题的研究。因为这已经不仅仅是当代沉积地质学、沉积矿床学，而且也是能源地质学、环境地质学（生态地质学），甚至生命起源、古生物学诸多重大学科能否赶上时代步伐的重要基础。当前生物、有机质地质学的研究早已成为地质学领域的热门前沿学科。

经过 40 余年的实践，我们对于生物有机质成矿这个概念终于有了比较明确的认识，

* 本章执笔：叶连俊（中国科学院地质研究所，北京，100029）。

从而增强了我们对生物有机质成矿研究的信心与决心。

在 1963 年以来发表的论文中已概括了笔者对成矿学说的新认识，并简述了对生物有机质成矿过程的简略观点：在《外生矿床陆源汲取成矿论》中，已经意识到生物有机质对成矿的重要性，确立了生物有机质是沉积成矿的关键步骤的观点；在《沉积矿床成矿时代的地史意义》中，已经意识到“成矿系列”、“成矿序列”、“成矿周期”及“成矿层位”与构造活动、海水进退、生物兴衰形影相印的问题；在《工业磷块岩物理富集成矿说》中，具体反映了生物有机质作用在成矿过程中是无所不在的（图 1-1），但它又不代表成矿作用的全部；在《沉积矿床多因素多阶段成矿论》中，则具体反映了沉积成矿过程的复杂性，其中既有生物、有机质因素的作用，也有环境中无机因素的作用，总之是有机与无机相互制约又相互迭加的产物。我们对生物有机质成矿有了一些初步理解，同时也发现了许多重要的、亟待解决的问题，加深了我们对生物有机质成矿研究的渴望。

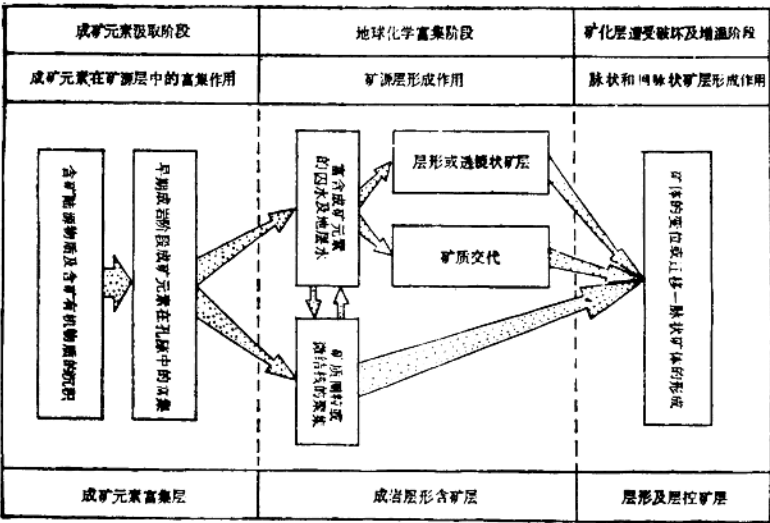


图 1-1 外陆架盆地成矿作用的过程和模式

1990 年由国家自然科学基金委员会和中国科学院资源环境局共同召开了“生物成矿讨论会”，与会者包括 8 位院士和近百名专家，从不同的方面进行了深入的学术探讨，一致同意“生物成矿”研究的立项建议。1991 年国家基金委批准了“生物成矿作用和成矿背景”重点项目的立项申请，于 1992 年正式启动执行。

立项的指导思想是从生物有机质成矿物质基础和成矿作用得以进行的“沉积环境和地质背景”两大方面进行追溯、深入研究生物、有机质成矿的标志、作用、过程和沉积环境及地质背景。考虑到项目的多学科性、杂交性，在技术路线上决定采取单学科深入、多学科协作、典型矿床解剖、野外“厘米地质”与室内测试鉴定，模拟实验、互相印证，相互促进的技术路线。为了突出重点，集中力量，决定以过去工作积累较多的川、黔、滇、桂以

及鄂西、陕南一带为重点工作地区,选择 Fe、Mn、P, Pb-Zn, 天然碱以及 Au 及 Ba 为重点解剖对象。项目共设:成矿标志、成矿作用和过程、典型矿床解剖、成矿模拟实验和成矿环境及地质背景 4 个二级课题,二级课题之下设若干三级课题,各司其责,共向项目负责。

二、生物有机质成矿作用的标志、过程、环境和背景

(一) 生物有机质成矿的物质基础标志

成矿标志可分为两个方面:一个是物质基础方面的标志,另一个是沉积环境和地质背景的标志。既要谈成矿物质的作用,就必需同时追究作用得以发生的环境和背景。

1992 年以来,我们从 10 个方面研究了生物有机质成矿的物质基础标志,即含矿岩系标志、生物标志、岩矿标志、生物标志物标志、有机碳含量标志、地球化学标志、同位素标志、沉积相域和生物相域标志、成岩过程标志以及沉积盆地演化过程标志。非常明显,这 10 项标志反映了生物成矿过程中各方面的重要作用因素和具体过程。

为了验证这些标志的正确性,我们进行了若干具体代表性的成矿模拟试验,以及相关的定位观测和模拟试验,以野外“厘米地质”与室内测试鉴定相结合的办法来反复印证。其成果大部分已汇集在已出版的三本专辑和分散发表的百余篇论文中,现在即将出版的这本专著主要是包括了几个代表性矿种的研究和模拟试验的总结和论述。

下面是几个代表性重要成矿标志的扼要阐述。

1. 含矿岩系标志

含矿岩系是一种含矿的具体代表性岩类组合和岩性序列特点的沉积组合,它的共同特点是:含较高的有机质,一般为黑色薄层状具明显页理或线理的岩套,特别是盆地型含矿岩系一般为碳、硅、泥黑色页岩型组合(上升洋流沉积组合),其所含矿层多出现在组合的底部或下部;有时也出现在上部,在那种情况下则多半含有较多的薄层碳酸岩和燧石层夹层。含矿岩系的厚度一般在 50~200m 之间,厚度在 50~100m 者居多,通常主要是由泥岩及粉砂质页岩组成,详细观察大部分含矿岩系均可较明显地分为上、下两部分:下部多以泥质岩为主,更富有机质,纹层构造发育,含隐粒状黄铁矿甚多,并常呈平行的线理分布;岩系的上部则多以粉砂质页岩或粉砂岩为主,成层较厚,为厚层状甚至块状。上、下两部分之间多有短时限的沉积间断,甚至可以见到帐篷构造、干裂或由褐黄色粗粒白云岩屑组成的透镜体(如在遵义松林晚震旦世陡山组含磷岩系所见),矿层大部分都出现在沉积间断附近,矿层有层状的,结核状的及透镜状的。含矿岩系的岩类组合及岩性序列特点因沉积相域的制约而有所差别,一般在浅海台地碳酸岩相域中多半含碳酸岩夹层较多,而在半深海外陆架盆地相域则以泥岩、粉砂质岩为主,二者的分界线为浅海陆架枢纽带(图 1-2、图 1-3)。另外一种情况是在沉积建造(脉动单元)中的 PU_0 及 PU_1 碳酸岩沉积组合中(图 1-9);含膏盐层的含矿岩系则多产在白云岩沉积系列之内,其底部多为白云质角砾岩,向上依次为白云岩、膏盐、石灰岩(图 1-4),其中的碳酸岩常含粒度不等的鲕状岩层。

2. 成矿生物标志

我们所重点研究的矿床多半是属于前震旦的长城纪、震旦纪及古生代的寒武纪、奥陶

纪、三叠纪。采集到的成矿生物化石多半属于原始菌藻类生物，特别是蓝绿藻为主。它们在矿层中多半成各类型的藻席或藻礁产出。例如在距今 18 亿年的“长城纪”底部的宣龙铁矿层中，造成叠层礁矿层的生物主要是矿化了的菌藻类生物，包括造席的丝状体蓝藻、胶鞘、真菌菌丝、铁细菌、生金菌属以及小球菌和细菌钻孔遗迹，在矿石的叠层柱体中普遍发育有串珠状的球状细菌。

在原生碳酸锰矿石中普遍见到锰质球形藻类化石，如高燕锰矿中就以球形变异球集藻和各种成分的菌球集合体最为常见。

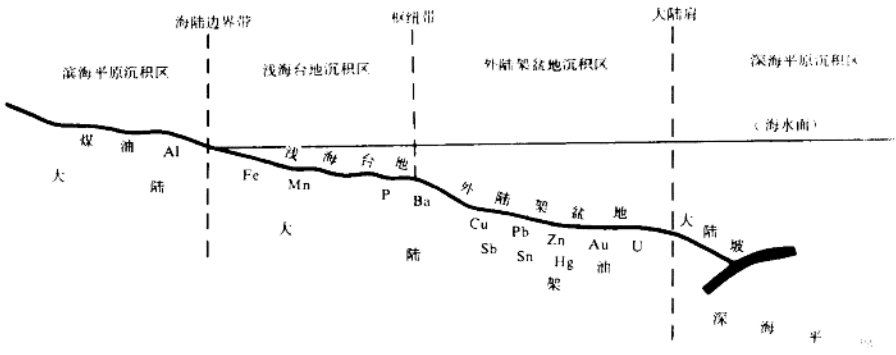


图 1-2 大陆架生物成矿域示意图

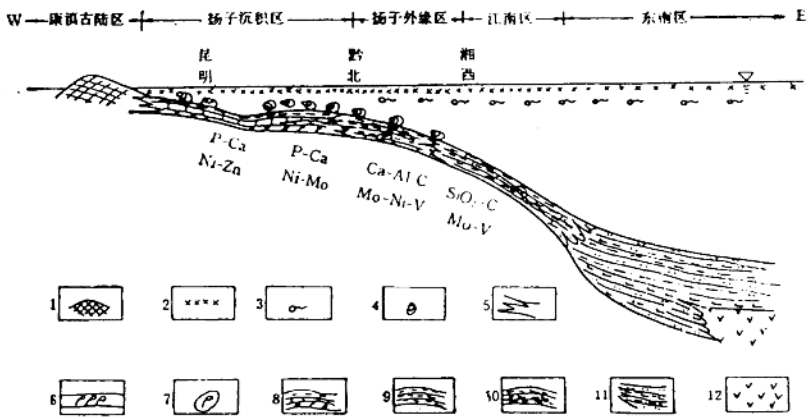


图 1-3 黑色页岩建造元素地球化学剖面示意图 (据张爱云, 1987)

1. 古陆区, 2. 浮游植物, 3. 浮游动物, 4. 底栖生物, 5. 岩相带界线, 6. 磷块岩, 7. 磷结核, 8. 碳酸盐泥质岩相带, 9. 碳酸盐-泥质岩-硅质岩相带, 10. 泥质岩-硅质岩相带, 11. 碎屑岩类复理石岩相带, 12. 深海火山岩

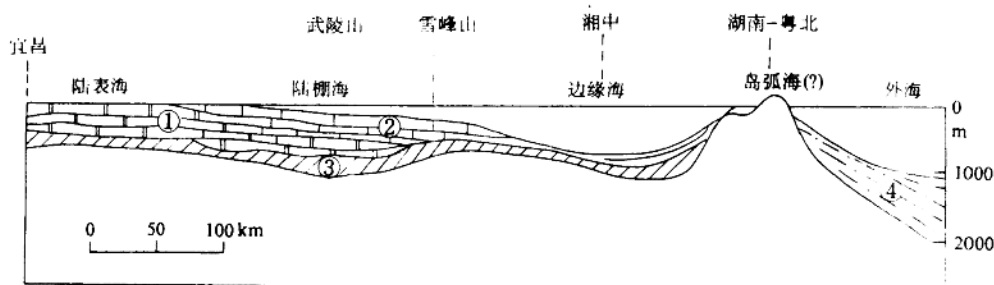


图 1-4 中国南部扬子区-江南区-华南区寒武系沉积相域示意图
(据王鸿祯等, 1980)

① 白云岩, ② 石灰岩, ③ 碎屑岩, ④ 细屑岩

磷块岩矿石中广泛发育着与其生因有关的藻类叠层石, 其中的微生物化石有丝状和球状两大类共 17 个种属, 其中的单列藻、古网藻和双壁球形藻与磷块岩的成因显得更为密切。在瓮安矿区, 我们发现了大量新类型的生物化石, 其中大型疑源类、绿藻类、红藻类和后生动物的碎片, 它们构成了一个复杂的生物群, 其中包括一些演化已相当高的分子在内, 此外在矿层底部还有繁多的大型软舌螺化石, 它们大部分都是矿化了的。

根据能谱分析, 不同矿石的 Sm-Nd 同位素组成以及碳、氧同位素组成, 磷质疑源类细胞的保存状态以及石内钻孔和充填物特征, 可以展现磷块岩各成矿阶段中生物成矿作用类型是各具特点的; 在早寒武世底部所见的小壳化石, 多半磷化甚深, 某些软舌螺的切片其硬壳部分多半由方解石组成, 相反其体腔内的“絮状”充填物均已磷矿化。在盆地型磷块岩矿石中所见与生物作用密切相关的“原生矿石”多为黑色, 具丰富的有机质, 但见不到生物化石的遗迹, 它们多半是伴以细粉砂级的沉积物。

在台地区域内, 几乎各类的“原生矿石”都富含生物化石, 有不少矿层几乎就是生物化石的集合体, 如藻礁、藻球等; 相反在矿层上下的“围岩”中, 则很少发现生物化石, 这也可能是由于工作不够的缘故。

3. 岩矿标志

关于生物有机质成矿的矿石矿物标志问题, 从我们工作过程中接触到的情况来看, 可能包括矿物的晶体形态特点、组构特点、物质组成特点 (元素组合及同位素组成)、成岩特点、沉积动力学特点 (即矿物的粒度及形成顺序如矿物的 Autogeny 和 Phylogeny 等方面生成顺序特点) 和有机质的参与形式、结晶形态特点等方面的问题, 而且这些因素又往往变动不居, 所以看来是相当复杂的。这里特别提出是觉得问题确实存在, 与生物有机质作用有关的矿石、岩石和矿物确具自己明显的标志, 而且其中有些现象已被许多研究者确认为生物有机质的矿物特点了, 如莓球状黄铁矿现在几乎已被公认是生物成因的了。过去对大洋锰瘤中所见的那些“绞纹”状构造谁也不给予确定的结论, 但仅仅过了不到 10 年时间, 现在谁也承认那就是藻叠层石构造了。另外沉积学工作者在其研究构造沉积相起因的岩相古地理时都会发现, 几乎所有形成于浅海台地上的碳酸岩层都呈厚层状, 甚至还有块状的粗晶白云岩或石灰岩出现, 但是及至过了碳酸岩台地与半深海外陆架盆地接壤的

“枢纽带”(Hinge belt)之后,就会变成薄层或纹层状的微晶或隐晶状的被认为生物成因的石灰岩夹层了。黔中古陆一带在下古生代是处于干热气候带。看来可以证明那里的白云岩是“原生”沉积成因的。我们确实已经证明在川、湘、黔、桂、鄂西一带所见到的磷、锰、钡等矿石中的藻类化石遗体,不管是层状的,透镜状的还是结核状的都无例外是细晶或隐晶状结构的,这些都可证明,它们是生物有机质成因的。当然也不是所有生物有机质成因的矿物都是微晶或隐晶质的,譬如我们所见到的各时代的海百合茎化石,就都是由一个单个方解石伟晶所构成,相当大的一部分或者说大部分介壳类动物化石的介壳都是具多层状结构的,肉眼即可见到是由不同形态的方解石或霏石组成的,它们有时呈纹层状,有的则呈小柱状、细粒状或羽毛状。以上这些是从结构上说的,若是从化石的整体来看,那么生物有机质作用形成的矿物标志就更是不言而喻了。这次所解剖的矿床绝大部分都是震旦纪、寒武纪的,所遇到的矿石矿物绝大部分都是由菌藻类生物构成的,所见到的矿石矿物更多的就是生物体本身的形态及纹饰,如菌、藻、疑源类、海绵骨针、软舌螺。如在昆阳磷矿所见,有些矿石薄层几乎全是由磷酸盐化了的小壳化石组成的。

磷灰石矿物的化学成分中含有由生物有机质分解演化而来的 CO_3^{2-} 的加入,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-3.6\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$ *, 与纳美比亚大陆架自生磷块岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相近;在磷灰石红外光谱曲线上有明显的甲基、羧基和羟基的吸收谱带出现,这是与生物源有关的官能团进入到磷灰石晶格中的反映,是生物有机质成矿作用的标志;磷灰石中还普遍含有数量不等的各种形态硫,根据 SO_4^{2-} 和黄铁矿硫同位素组成特征还可以判断在成矿过程中发育有细菌微生物活动的踪迹。

经我们的鉴定、测试及模拟试验,所研究过的震旦纪、寒武纪、泥盆纪的沉积磷矿石,几乎都是由细晶磷灰石即碳氟磷灰石组成,另外就是有少量的碳羟磷灰石(或称胶状磷灰石)呈胶体结构产出,多在风化带中或含磷砂岩中以胶结物形式出现,多形成于沉积界面附近的风化带中(图 1-5、图 1-6),是含有机质孔隙水的溶解物经成岩老化而

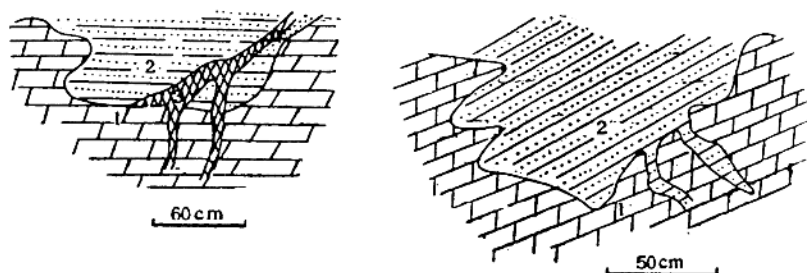


图 1-5 磷块岩对其下伏硅质白云岩的交代和充填

1. 硅质白云岩; 2. 内碎屑磷块岩; 3. 浸染状胶状磷块岩脉

* ‰ : 在同位素测量中可以应用, 全书同。

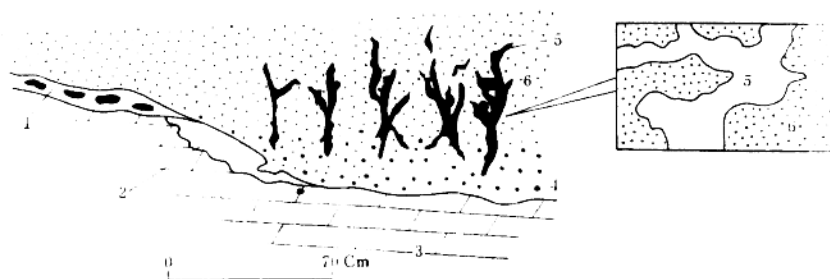
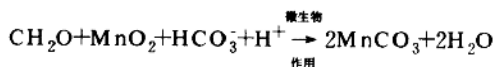


图 1-6 昆阳磷矿层中的磷酸盐“毛细管脉”

1.硬地;2.硅化带;3.白云岩;4.粗砂屑磷块岩;5.“毛细管脉”磷酸盐;6.致密状砂屑磷块岩

成，它们在镜下多呈筛网状或纤状产出（照片 5），它形成于沉积介面附近的氧化带与还原带过渡处，是经有机质溶解沉淀的产物，多半是氧化带底部海解带的产物。细晶磷灰石的镜下特点是隐晶或细晶状，是成岩还原带上部到氧化还原介面的产物，它的成分中富 I 海洋学家公认 I 是来自海藻，这显然证明细晶磷灰石是生物有机质成因的。在我们所研究的磷块岩中， P_2O_5 几乎主要浓集在叠层石柱体中的暗色纹层（富藻层），而柱体之间纹层状磷碎屑沉积物中磷的含量要低得多，因为在磷碎屑层中混入了大量陆源碎屑物（照片 1）。

除了磷块岩矿床之外，我们研究较多的是工业碳酸锰矿床，其中早震旦世、晚震旦世、中晚奥陶世的矿床都是规模较大的工业矿床。最早引起我们对生物有机质成矿的注意的是湖南上五都锰矿床，那里在 50 年代以前开采的几乎全部是地表氧化带的黑色硬锰矿和少量的软锰矿；矿洞里流出的无色透明的溪水也是含锰的，河底的卵石表面都蒙上了一层薄薄的硬锰矿，山坡上小树的根茎也都包上一层厚厚的硬锰矿壳，就连当地常见的蝗虫也变成硬锰矿黑色，这样一个生物成矿天然试验室展示的具体形象应当是无容置疑的：地表的矿石是黑色的，树茎是黑色的，蝗虫是黑色的，但矿洞流出的溪水是无色的，埋在地下 10 余米位于流动地下水带之上的矿层却是淡灰色的，以致于被矿工称之为“石灰岩”层，原因是那时我们还没有清楚地意识到生物成矿所造成的环境变迁的问题。现在我们已经认识到生物有机质形成碳酸锰矿石的机制是如下一个过程：



是有机质在其成岩变化过程中，把 MnO_2 还原成低价锰，然后又有一定的酸碱度演变条件下造成 MnCO_3 沉积。有机质不仅为 Mn 提供了物源，而且准备了沉积成矿的物化条件。未矿化的方解石、白云石和菱锰矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 有明显的差别，菱锰矿具有更负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，表明其碳源是来自生物有机质的。湖南上五都的矿层中密密麻麻分布的几乎都是球集藻及疑源类化石，而不含矿的容矿岩石中藻类化石则很少，经化学分析此矿层的有机碳含量又是异常的少，更说明菱锰矿层的形成是需要更多的生物碳的供给的。

我们对硫化物多金属矿床的生物成因的论证、模拟与测试不但取得了如期的成果，不但证明了矿床学家们的石油运移富集说，而且进一步取得了新的认识。过去，研究者们更多地是推敲矿石矿物流体包裹体中富集的氯化物及黄铁矿的存在，因而“石油运移论”的学说是有的，但我们的工作则试用了“萤光法”做进一步的努力，结果认为硫化金属的搬运者更可能是油田热水（温度可选 300℃），特别是其中的醋酸溶液起到了更大的作用，并从而对层控 Pb-Zn 矿的物质来源提出了“双源说”的新见解。

以上这些事实结论大部分是经由反演论证而得来的，我们在工作同时还进行了若干矿种的模拟试验，结果证实了金属成矿元素的活化、迁移与沉淀成矿都是没有脱离微生物作用的。给我们感触最大的莫过于对砂金及“狗头金”的认识。以前我们对这类金矿石总以为是与脉金有关，因为金是一个惰性元素。这次我们研究了硫化物矿床有关的铁帽型金矿、对腾冲一带热泉形成的泉华金矿，进行了有关的模拟试验，从而认识到金的形成可以与某些微生物活动有关。细菌活动对含金岩层的风化、淋滤及沉积成矿都存在着根本的影响，杆菌、单细胞菌及其他产氨基酸的细菌及其代谢产物都可汲取及溶释金，有些微生物能直接聚集和沉淀金。以前我们总习以为砂金、狗头金等都是来源于“山金”的，现在才知道并不存在这种必然性。大量的事实就是如此。金元素的地化本性没有变，只不过是有了微生物的作用，有了腐植质的腐解与热解作用罢了，不然为什么有那么多的砂金？为什么有“狗头金”？又会像“狗头”、“小狗”、“小猴”？又缘何具“炉渣状”、葡萄状构造？就在 1997 年美国的同行们已经在阿拉斯加的砂金矿粒中找到了微生物的遗迹，其中蜡状芽孢菌可将溶蚀的金结晶出来。

在我们工作之初总不放心那些矿化了的生物残体是不是主要还只是生物的吸附或吸着作用的结果，后来经过对多种矿床如 Mn、P、Pb-Zn、Cu 等进行了成矿模拟试验才证明了：微生物的矿化作用不只是吸附，同时还存在着吸收，即矿化作用不仅仅是“胞外的”，而且还有“胞内的”，其中“胞内的”还常常占有较大的份额。

生物不但可以从固相物质中活化聚集成矿，而且也可以从湖水中吸收富集碱及其他矿物元素，我们对内蒙古碱湖的研究和长期的野外观察完全证实了这一点，细菌可以从碱湖水中富集碱，而且随湖水的蒸发，湖水的盐度愈来愈浓，不但湖水的颜色变了，而且微生物的种属也随着发生变化。

4. 生物标志化合物标志

研究了湘西乐梅铅锌矿的有机组分特点，发现矿层相对于围岩明显地富集异构烷烃，初步证实是蓝细菌（藻）对成矿元素的形成作用，并同时提供了丰富的有机硫，对于具后生特点的湘西铅锌矿来说，其矿石中有大量烃类包裹体存在，CH₄ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -27.48‰，CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -19.43‰，CO 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -19.39‰，都是有机质参与成矿的证据；矿床中还有多种含有机质的矿物，如萤石、方解石与之共生，经多种测试确认也是有机质参与成矿的结果。

5. 碳、硫同位素和有机碳含量标志

盆地型磷块岩的成矿主要发生在含矿岩系最富有机质的层段，如四川秀山早寒武世矿化段岩石的 TOC 高达 7.8%~11.6%，湘西沅陵矿化段的 TOC 为 12.7%，贵州牛蹄塘矿