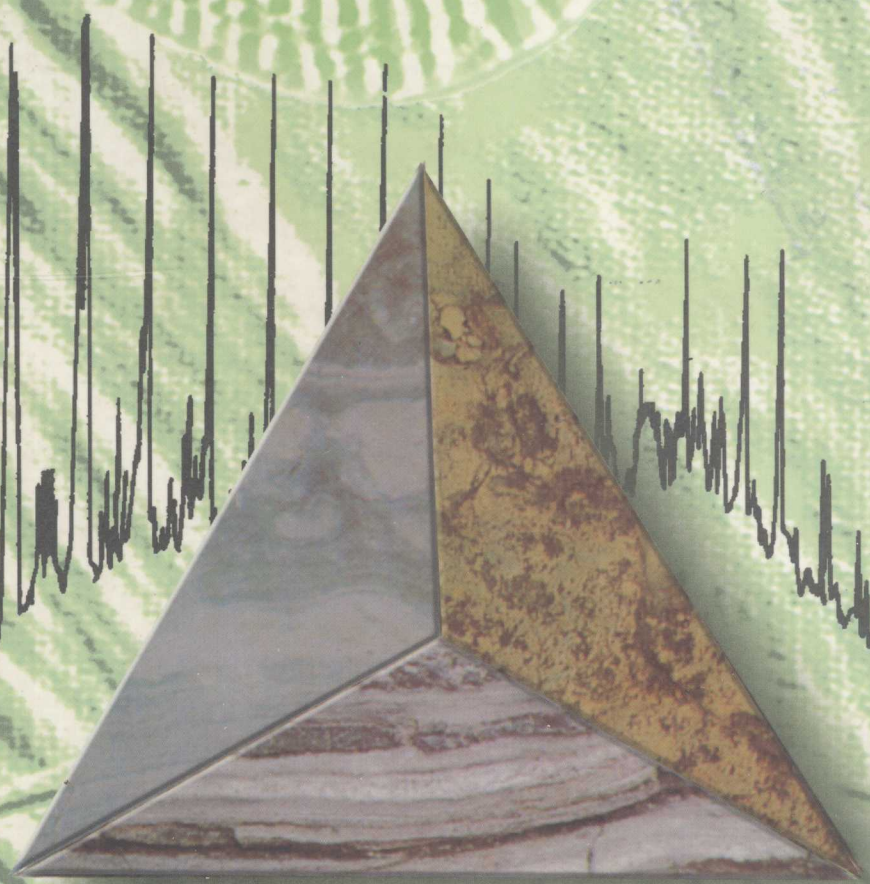


中国地质大学“创新工程”丛书

生物成矿系统论

殷鸿福 张文淮 张志坚 等著
祁士华 谢树成 周修高



中国地质大学出版社

中国地质大学“创新工程”丛书

生物成矿系统论

殷鸿福 张文淮 张志坚
祁士华 谢树成 周修高 等著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书以生物-有机质-有机流体成矿系统为主线,将生物-有机质-流体系统演化,生物成矿作用全过程(活化萃取—传输—沉淀富集)和盆山体系构造演化三个子系统紧密结合起来。在传统生物成矿理论和资料的基础上,通过几年来对四川东北寨、滇黔桂多金属矿带和长江中下游铅锌银锰多金属矿床的野外调查、分析测试和实验模拟揭示了生物-有机质-有机流体在成矿作用过程中的重要作用,如在成岩成矿早期,生物、有机质通过吸附、吸收使金属元素预富集;有机流体在低温下使金属元素活化,并形成可溶性金属有机络合物长距离迁移;最终在有利条件下沉淀富集。讨论了盆-山体系构造演化过程中流体的演化、迁移及与成矿的关系。揭示了流体是将生命有机质与无机质联系起来的纽带。

图书在版编目(CIP)数据

生物成矿系统论/殷鸿福等著. —武汉:中国地质大学出版社,1999.4

ISBN 7-5625-1376-7

- I. 生…
- II. 殷…
- III. 生物-成矿-系统论
- IV. P611

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山 邮政编码 430074)

责任编辑 李继英 魏 民 责任校对 熊华珍

印 刷 中国地质大学出版社印刷厂



开本 880×1230 1/16 印张 13.5 字数 450千字 图版 3版

1999年4月第1版 1999年4月第1次印刷 印数 1—500册

定 价:25.00元

ISBN 7-5625-1376-7/P·498

序

殷鸿福院士、张文淮教授等牵头的科研集体经过将近 10 年的努力与探索,完成了《生物成矿系统论》专著,将我国生物成矿研究推向新的、更高的台阶。

作者们全面、系统而细致地对待生物成矿作用。书中的“生物”概括了生物及其衍生物、有机质、有机流体之总体,而“成矿”则涉及形成矿床之全过程,即成矿物质的萃取、搬运、富化及超常富集成矿等。将广义的生物和成矿结合起来,便成为生物成矿系统论的主导思路。传统的生物成矿论多侧重生物因素在成矿物质超常富集,就地成矿中的意义,作者们的大量艰辛工作适度而又深入地拓展了这一领域。

生物成矿作用是当今矿床学的热门前沿课题。开拓性研究它要立足于多学科高层次的剖析与综合,作者们正是这样做的。科研集体包括了古生物学家、矿床学家和地球化学家。他们在我国一些重要成矿区带采取了野外调查、分析测试和实验模拟相结合的技术路线,共同观察、切磋讨论、碰撞融合、取长补短才得以写成此专著。

相信生物成矿研究在今后将会更加广泛和深入地开展下去。生物成矿的应用领域将会逐渐与普查评价、矿石加工、环保等事业相结合。在理论建树方面,生物成矿将有可能与生命起源和演化逐渐挂起钩来。这两个领域看似风马牛不相及,实际上存在一定的有机联系。正是在后一领域,近来人们的思路十分活跃,提出了一系列新观点,如生命起源于热水而非冷水、深海而非浅海、大陆而非海洋,20 亿年前即出现了陆生植物等。尽管这些问题只是刚刚提出,还处于初始摸索阶段,距离符合客观的回答还很远,但它们确实拓宽了眼界。生物成矿及生命起源两大探索领域将会相辅相成,互相促进。

浮老松

1998. 5. 28



录

前言	殷鸿福(1)
第一章 概论	殷鸿福 张文淮 周修高(2)
一、历史的回顾	(2)
二、近年来主要进展	(3)
(一)成矿机理方面的进展	(3)
(二)研究范围的拓宽	(3)
(三)实验模拟方面的进展	(4)
(四)应用研究方面的进展	(6)
(五)研究手段的现代化	(7)
三、研究思想体系——生物成矿系统论	(8)
(一)生物-有机质-有机流体子系统	(9)
(二)生物成矿作用子系统	(10)
(三)盆-山体系演化子系统	(19)
(四)生物成矿系统论的研究方法和研究手段	(22)
第二章 生物成矿系统中生物的作用——以川西北地区拉尔玛和东北寨金矿床为例	林 丽 谢树成(25)
一、拉尔玛金矿床的生物作用	(25)
(一)矿床基本特征及盆-山构造演化	(25)
(二)矿床的生物、有机地球化学特征	(27)
(三)生物参与成矿作用的依据及方式	(31)
二、东北寨金矿床预富集过程中生物的作用	(35)
(一)矿床基本特征	(35)
(二)沉积期间藻类参与矿源层中部分金的预富集作用	(36)
(三)沉积成岩期细菌参与金矿源层形成的作用	(39)
(四)生物参与形成东北寨金矿的贡献大小	(40)
(五)有机质在主成矿阶段的作用	(42)
第三章 生物成矿系统中有机流体的作用——以黔西南地区烂泥沟等金矿床为例	张志坚 张文淮(43)
前言	(43)
一、区域地质及盆-山构造演化子系统	(44)
(一)地层	(44)
(二)构造	(46)
(三)岩浆岩	(49)
(四)区域有机地球化学特征	(50)
(五)区域构造演化简史	(51)
(六)区域盆地演化简史	(52)
(七)区域矿产	(53)
二、有机质-有机流体演化子系统	(53)
(一)矿床地质及有机质	(53)
(二)成矿流体特征	(70)
三、有机流体成矿作用	(80)

(一)成矿条件分析.....	(80)
(二)卡林型金矿与有机成矿流体的关系.....	(85)
结束语	(93)
第四章 滇黔桂地区金矿床的生物成矿系统——以广西金牙金矿床为例	祁士华 王红梅(95)
前言	(95)
一、区域地质及盆-山构造演化子系统	(96)
(一)区域地质背景.....	(96)
(二)矿区地质.....	(98)
(三)有机地球化学初步研究	(101)
(四)右江盆地沉积构造演化	(103)
(五)桂西北中三叠世岩相古地理	(106)
(六)金牙矿区成矿构造子系统	(110)
二、生物-有机质演化子系统.....	(111)
(一)金的盆源性证据研究	(111)
(二)盆地生物-有机质演化.....	(115)
(三)含金有机流体的动力学运移	(126)
三、生物成矿作用子系统研究	(129)
(一)成矿流体性质研究	(129)
(二)高温高压地球化学实验	(148)
(三)区域成矿作用的热力学研究	(152)
(四)金牙矿区流体-成矿子系统讨论.....	(158)
四、结论与建议	(158)
第五章 长江中下游铅锌银多金属矿床的生物成矿系统——以南京栖霞山铅锌银锰矿床为例	谢树成(160)
一、区域内与生物成矿系统有关的成矿迹象	(160)
(一)沉积成岩期生物、有机质成矿作用迹象.....	(160)
(二)热液成矿期有机质、含有机质流体参与成矿作用的迹象.....	(161)
二、矿区地质及盆-山构造演化子系统.....	(162)
(一)矿区地质	(162)
(二)矿床特征	(163)
(三)盆-山构造演化.....	(165)
三、生物-有机质-有机流体演化子系统	(166)
(一)矿区生物、有机质特征.....	(166)
(二)矿床有机地球化学	(167)
(三)成矿流体特征	(173)
(四)有机包裹体成分	(176)
(五)成矿流体的其他物化参数	(177)
四、生物-有机质-流体成矿作用演化子系统	(178)
(一)生物-有机质-流体成矿作用的证据及方式	(178)
(二)系统的作用模式	(181)
(三)生物-有机质-流体成矿系统的归结	(183)
参考文献.....	(187)
英文目录与英文摘要.....	(196)
图版及图版说明.....	(208)

前言

生物成矿作用是国际上 70 年代以来蓬勃发展的地学前沿研究领域。在我国,叶连俊院士等从 80 年代后期首先开展生物成矿作用研究。涂光炽院士等也多次强调了有机质在成矿中的作用。在他们的启迪下,我们于 1989 年组建了生物成矿科研组,由地层古生物学、矿床学、地球化学等学科的 9 名成员组成,开始这方面的研究,并于 1992 年获得地质矿产部“生物成矿作用”重点学科生长点项目资助。由于铁、锰、磷等的生物成矿研究已有人在做,我们的工作就从金做起,并在川甘边境一些金矿野外研究和室内实验方面证实了存在生物成矿作用。但当时仍着重于生物和有机质在原地的富集或预富集作用。随着研究区域的扩展(青海、黔桂、下扬子)和矿种的多样化(铅、锌、汞、锑、银等),逐渐发现有机流体在许多矿床形成中起着重要作用。经过多次讨论,于 1993 年形成了生物-有机质-有机流体成矿系统的理论概念(殷鸿福、谢树成,1994),它由三个子系统构成(见正文)。四年来的工作证明这个体系在理论上有所创新,并对实践有指导作用,因此我们把它总结出来,希望能对成矿作用研究有所贡献。同时在这一体系指导下,我们正在向生物找矿和生物选矿方向拓展。

全书由总论和反映生物成矿系统及其子系统的实例研究组成。第一章由殷鸿福、张文淮、周修高撰写;第二章由谢树成、林丽撰写;第三章由张志坚撰写,张文淮参与了讨论、修改;第四章由祁士华撰写,王红梅参与了野外工作和讨论;第五章由谢树成撰写,周修高参与了讨论、修改。全书由张文淮统编。殷鸿福参与了第二至五章的指导。

本书中的各项研究先后获得下列基金的资助。它们是:原地质矿产部“生物成矿作用”重点学科生长点基金(92012019),国家自然科学基金“川甘青边境印支期生态地层学研究”项目(48970080),“黔西南低温矿床成矿流体中有机质与矿化关系研究”(49672114)及“南京栖霞山铅锌银矿床的生物-有机质-流体成矿系统”(49702021),国家教委博士点基金“生物成矿系统中有机热流体热力学及动力学研究”(9449101),国家“八五”攻关项目子课题“长江中、下游石炭、二叠、三叠系海盆演化与多金属矿床关系”,以及中国科学院南京地质古生物研究所、广州地球化学研究所、贵阳地球化学研究所等国家重点实验室和开放实验室研究基金的资助。

在研究过程中,得到四川、甘肃、贵州、广西、江苏等省(自治区)野外地质队各方面的大力支持,我们表示深切的感谢。研究工作还得到了叶连俊院士、涂光炽院士、常印佛院士、杨遵仪院士、傅家谟院士、翟裕生教授、胡明安教授、李朝阳研究员、李任伟研究员、盛国英研究员、李院生副研究员及许多院校、研究所老师和研究人员的热心指教。对协助我们进行测试、绘图等工作的各位同志在此一并表示感谢。

第一章 概 论

一、历史的回顾

自从地球上出现生物以来,有机物与无机物就不是相互割裂,而是相互依存、相互作用,并在一定条件下相互转化的。早在1830年赖尔在他的《地质学原理》一书中定义地质学时说:“地质学是研究自然界中有机界和无机界相继变化的科学,它探讨这些相继变化的原因,及其对地球表面与外部构造所发生的影响。”因此生物及有机质必将以某种形式不同程度地参与金属矿床成矿作用。早在本世纪初生物成矿作用就引起了一些地质学家的注意,例如Murrayh和Renard提出了磷酸盐沉积的生物成因观点。30年代,维尔纳茨基提出了在锰矿床形成过程中生物可能起了某种重要作用。在地球表层,生物作用是最活跃、最强大的地质营力,对大气圈、水圈和岩石圈产生强大的影响,使它们发生深刻的改造,也必然对沉积岩石圈内矿产的形成和改造产生巨大的影响。煤、石油和天然气属生物成因,这已成为普遍认同的科学常识。1915年Seebenthal首先提出了生物成矿的概念。然而,长期以来由于科学技术的限制,没有真正认识生物成矿作用的重要性,因此不可能投入应有的人力和物力对生物成矿作用进行详细研究。只是到了本世纪60年代,生物成矿作用的研究才在一些国家陆续展开,使生物成矿作用的研究取得某些进展。关于有机质在元素迁移富集过程中的作用,曾经积累大量研究资料。C.M曼斯卡娅与T.B德罗兹多娃(1964)在《有机质的地球化学》一书中做了较系统的归纳,重点论述了沉积岩有机质对铀、钒、铜、锰、钴、镍、金、银、锌、铍等元素的富集作用。Bass Becking在澳大利亚做了大量生物成矿实验工作,他指出,研究细菌形成硫化物的问题是很有前途的。他和别人一起发表了生物形成硫化物的第一批较详细的实验资料。1965年澳大利亚建立了Bass Becking地质生物实验室,专门实验研究微生物在层状硫化物矿床形成中的作用。但总的说来,研究进展较缓慢。近20年来,在铁、锰、磷、铝、金、铀、铜、铅、锌、硫等多种元素的沉积(和层控)矿床中也发现了大量生物作用的证据。1954年,Tayler和Barghoon在含铁建造中鉴定出一套复杂的微生物群落以后,一些学者,特别是Cloud(1973)根据早期Gruner的思想提出含铁建造属“有机”或部分属“有机”沉积物的观点。直到70年代以后,人们发现了越来越多的生物参与矿床形成过程,并对生物富集、搬运和沉淀某些金属的机制作了一些研究,世界各国逐渐对生物成矿作用研究发生兴趣,特别是近年来一些学者对世界上已发现的大型、超大型矿床的研究,发现生物在其中的某些矿床中起了重要的甚至是关键性的作用,生物成矿作用引起了广泛的重视。Saxby(1977)提出了一个重要论点,他认为由于有机质的热稳定性低,尽管目前许多变质程度较高的沉积改造型矿床中有机质含量不高,但有机质在金属的沉积、活化迁移、富集成矿中的作用可能远比我们认识的大得多。Giordano(1981,1985)、MacQueen和Powell(1983)等人测定的关于成矿溶液中有机质组成的资料,为后来的研究者提供了有益的依据。近年来一些国家相继成立了专门研究机构。第28届国际地质大会中,有关生物成矿的研究论文空前增多。我国学者叶连俊(1964)等对表生条件下各种形式的有机质与金属(及某些非金属)成矿做了较系统的工作,重点探讨了有机质对元素的络合、吸附、迁移富集的影响。研究主要集中在一些生物(有机质)作用十分明显的沉积(或受到轻微改造作用)矿床,如磷矿、沉积铁矿、锰矿以及黑色高碳岩系中的铀、钒、钼等。涂光炽(1984,1988)明确提出了油气矿床与活泼金属成矿相关性的理论。他认为在成矿机制方面,油气矿床和沉积改造型矿床有一定的相似性。1990年3月由国家基金委和中国科学院资源环境科学局联合召开“生物成矿研讨会”,这对我国有组织地深入开展生物成矿研究创造了良好条件。近年来,国内外在生物成矿的理论和实际应用等各方面取得了

引人注目的成就,殷鸿福等(1994、1995)提出生物-有机质-流体成矿系统。可以预见,随着实验技术的进展,大洋中脊现代热泉系统中生物成矿现象的不断发现,以及对某些矿床中生物参与成矿过程的深入认识,生物成矿作用的研究将得到更加迅速的发展,必将使现有的成矿理论更加丰富和完善。

二、近年来主要进展

(一) 成矿机理方面的进展

近年来许多学者对生物成矿作用的机理和成矿作用模式作过论述(Trudinger, 1979; 罗永国, 1979; 刘魁梧, 1990; 汤葵联, 1991; 郑明华, 1991; 杜汝霖, 1992; 叶连俊, 1996等),并将生物成矿作用定义为生物及其产生的有机质在矿床形成过程中的作用。其中,叶连俊(1996)对生物与有机质在沉积矿床形成中的作用机理,作了全面概括。在空间展布方面,他提出生物有机质成矿带主要展布于陆架海区三个构造地貌转折带,即滨海带(氧化物矿床)、台地-外陆架盆地枢纽带(碳酸盐矿床)和外陆架盆地区至大陆坡地区(硫化物层状和层控矿床)。在层序位置方面,主要出现在海水进退脉动单元的低位域中的海相与陆源碎屑相交错的混积岩段、上升洋流入侵段、生物繁盛段和沉积速度频繁变化的细碎屑岩段。在地史上,生物成矿可分为三个阶段,即晚元古代—早古生代陆缘海相生物成矿阶段,晚古生代—早中生代的海陆相间的生物成矿阶段和中、新生代陆相生物成矿阶段。陈其英、范德廉、李任伟等对磷、锰、蒸发岩的生物成矿机理作了富有成效的研究。

自从1873年发现海洋锰结核以来,许多科学家从不同角度探索其形成与生物的关系。有些学者在锰结核中发现了有孔虫、放射虫等各种微体生物化石,并试图推断出它们与锰结核形成的关系,但是他们并没有找到微生物参与锰结核形成的直接证据。能使铁和锰氧化的细菌,如杆菌中的 *Gallionella*、鞘铁菌中的 *Siderocapsa* 和鞘细菌中的 *Leptothrix*, 它们对铁、锰的氧化和聚集起着重要作用。大洋多金属结核的主要成矿元素(如 Fe、Mn、Ni、Co、Cu、Pb、Zn 等)在大洋中各处的浓度很低,远未达到各元素沉淀的饱和浓度值,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。可是,就是在这种成矿元素浓度很低的洋底水与沉积物界面处,却形成了巨量的多金属结核。很明显,对多金属结核的形成机制,不可能从单纯的化学作用中求得答案。于是,一些学者开始了微生物活动与多金属结核成矿关系及成矿作用机理的研究。从锰结核中发现了锰还原菌,认为细菌活动有助于结核的形成。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、锰及其他金属被氧化产生不溶于水的氧化物,这种物质不断积累,从而形成多金属结核。阎葆瑞等(1994)对微生物活动在铁、锰的氧化和还原中的作用以及与多金属结核成矿的关系进行了系统研究,结果表明,氧化铁和(或)锰中的细菌可以促使 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 氧化,生成难溶的高价铁和锰的氧化物,在细胞外聚集成鞘,这不仅有利于洋底水中以低价态溶解形成的铁和锰的化合物氧化,形成高价态的铁锰氧化物和氢氧化物絮凝沉淀,由液相转入固相,而且有利于已经还原溶解的成矿物质再次氧化沉淀,在多金属结核成矿的成核阶段起成核作用。他们认为氧化铁和(或)锰中的细菌在多金属结核成矿中起着关键性的作用。最近,张富生等(1994)在太平洋深海锰结核中发现了两种纳米级超微生物化石,即中华微放线虫 *Miniactinomyces chinensis* 和太平洋螺球孢菌 *Spirisphaerospora pacifica*, 它们栖息在各种坚硬的物体表面,通过生理作用吸收铁、锰等元素,并将其固定在机体组织中。这两种超微化石在锰结核的包壳中随处可见。因此,它们是锰结核的建造者,锰结核是这些超微生物的建造体。当这些超微生物降解后,铁、锰等元素保留在体内,直接成矿。新一代超微生物在其表面继续生长、发育和降解。这种过程周而复始,最终便形成了现在的锰结核。这是微生物直接成矿的作用过程。

(二) 研究范围的拓宽

长期以来生物成矿作用主要研究与表生条件和沉积作用明显有关的矿床。目前生物成矿作用研究已由典型的沉积矿床(如铁、锰、磷、铝等),延伸到火山沉积矿床、沉积改造型矿床和某些典型的热液矿

床之中。近年来生物成矿作用研究最大的拓宽是在有机流体成矿作用方面：

(1) 俄罗斯和德国的大陆科学深钻发现，在地壳 8~12 km 深度范围内仍存在大量流体，并正发生着流体-生物-成矿作用；瑞典深钻在 4~6 km 的结晶岩中亦获得了大量含烃类的高盐度流体矿泥。这些深钻结果表明，地壳深部存在 CO_2 -烃类-盐水流体以及某些微生物。

(2) 对北美大陆内部地质、地球化学、钻探等综合研究证实，大型、特大型矿集区和油气田的形成和分布主要受盆-山转换系统地壳流体大规模、远距离运移的控制。该区特大型密西西比河谷型矿床存在大量烃类包裹体，成矿流体由烃类和盐水流体构成。我国滇黔桂卡林型金矿以及长江中下游石炭、二叠、三叠系某些层控矿床的成矿流体中均存在许多烃类。

(3) 在现代海底活动热水区，海底喷流与硫化物矿床附近伴生大量石油产出；在弧后扩张盆地的海底喷流与大量 CO_2 和烃类共生。

(4) 一些油田，Au 可达工业品位，Hg 储量可达超大型规模。

这些事实证明，某些金属热液矿床与油气矿床实际上是由统一的成矿流体系统形成。烃类流体和 CO_2 流体对金属元素的活化萃取、输运转移和卸载聚集至关重要。

通过流体包裹体研究有机流体在成矿中的作用，是生物成矿作用研究的重要方面。在很多矿床流体包裹体溶液内鉴别出碳氢化合物，引起了矿床学家的极大兴趣。谢树成等 (1997) 率先在国内从包裹体溶液中检测出生物标志化合物，是生物及其演化产物参与成矿的有力证据。一些研究者在密西西比河谷型矿床的流体包裹体内发现了有机质。Etminan and Hoffman (1989) 的研究表明，方铅矿和闪锌矿中流体包裹体捕获的碳氢化合物来自盆地深部。碳氢化合物包裹体内生物标志化合物的鉴别，以及将其与石油和富有机质地层对比，为研究石油源区及其运移开辟了一个新的领域。这种方法也可以解答有关密西西比河谷型 Pb、Zn 矿床中石油与富金属卤水的成因及运移时间等基本问题。总之，利用流体包裹体内存在的有机质研究生物成矿是刚刚兴起的一个方向。目前，有关这方面的研究还很有限，但这种研究具有广阔前景。

随着研究的不断深入，生物成矿作用研究向着多矿种和多种矿床类型方向发展。例如，前文所述微生物对大洋洋底铁锰结核的形成起了积极的作用。1980 年法国和美国联合考察太平洋中脊时发现，在热液喷口附近存在大量的双壳类软体动物和其他生物群，以及以化能自养细菌为基础的食物链。软体动物等生物群以微生物为食，而这些微生物则以摄取含多种金属的流体为食料，这些金属则由喷出的含矿质的热水溶液所提供。这是人类对生物聚矿的首次直接观察，具有重要的理论和实践意义。在洋中脊喷口处，在 250°C 和 265 个大气压条件下，甚至在 300°C 高温溶液中，一些细菌还难以置信地、活跃地进行分裂繁殖活动 (古宇田、亮一，1983)。并发现在热液喷口附近，存在摄取 Fe、Mn、P、S 等矿物质的微生物，这些发现导致了火山沉积矿床和热液矿床中生物成矿的研究。成矿流体中有机质的加入，形成了有机流体，对金属的活化萃取、络合、吸附、搬运和沉淀起了重要作用。由于这些富含金属元素的有机流体的流动特性，使得它们可以在构造应力驱动下长距离迁移，并在各种有利的地质条件下成矿。因此，现在可以在沉积岩、变质岩、岩浆岩等各种不同的岩层中，寻找与生物、有机质和有机流体有成因联系的金属矿床。这不仅大大拓宽了生物成矿的范围和生物成矿研究的内容，也丰富了金属矿床的成矿理论。

(三) 实验模拟方面的进展

大量野外地质现象的观察和有意义的模拟实验的开展，为生物成矿理论提供了有力的证据。而且模拟实验，在很大程度上可以弥补人们不能直接观察成矿作用的缺陷。Bass Becking 等人、Rickard 以及 Trudinger 先后在天然生物系统作用下合成了 Cu、Pb、Zn 和 Ag 矿物。刘志礼、李朋富 (1996) 对藻类参与铜矿和锰矿形成过程的模拟实验表明，藻可在元素富集、改变环境 pH 值 (上升)、Eh 值 (下降)、改变水体中元素平衡系统等方面，对铜矿和锰矿的形成发挥作用，而藻腐殖质可在元素富集和溶解 CuS 等方面对铜矿和锰矿的形成发挥作用，如藻在有氧条件下形成的不溶性腐殖质对 Mn^{2+} 的富集能力极强，富集锰可达 30%，这为铜矿和锰矿的生物成矿作用研究提供了一些生物学方面的依据。拉尔玛金矿是我国川甘陕“金三角”中的典型矿床，林丽 (1994) 的实验表明，菌藻生物对金有强烈的富集作用，不同生

物对金的富集作用强弱不同；热水环境中的生物与常温条件下的生物相比，前者对金的富集作用强烈，因此，热水环境下，生物对金的富集成矿更为有利；研究表明该区菌藻类生物在矿源层形成过程中起了主要作用。

世界上许多砂金矿床（如西伯利亚、阿拉斯加、黑龙江流域及中国西部高原）都处于高寒气候带，而且在其附近并未见有原生金矿床或富金地层；一些砂金矿开采了20~30年后，又重新发育成一个砂金矿。砂金矿的成因令人长期感到迷惑不解（Boyle, 1979），一直存在碎屑说和化学成因说之争。我国学者陆元法等（1994）对中国中西部地区块金（或称狗头金）集中产地和砂金矿矿区，作了大量野外和实验研究。他们通过微生物溶金、聚金、粘连等模拟实验，对该区砂金、块金的形成机理研究，取得了引人注目的成果。研究表明该区存在相当数量有溶金作用的微生物，某些菌株，在适宜条件下，经过15天培养，其溶金率一般可达1‰~6‰，最高可达12.4‰。虽然这些细菌的溶金能力初看起来并不太高，但考虑到这些细菌的数量和作用时间，其溶金能力就不能忽视。矿区的化能自养菌和某些化能异养菌通过微生物的氧化-还原作用，将金矿中的Au形成可溶的金络离子等存在于天然水体中，随水迁移，为“狗头金”和砂金的形成提供了基本物质条件。微生物聚金模拟实验发现，在生长早期菌体以其鞭毛、荚膜、粘液层对金进行胶体吸附；在生长后期缺氧条件下代谢，pH值降低使金发生沉淀。所以实际上，聚金微生物具有双重作用，即在微生物培养生长的初期和中期，进行金的吸附聚集，而在生长的后期，则对金进行还原沉淀。微生物对可溶金的吸附聚集，以及对吸附的金络离子进行还原沉淀作用，是每时每刻、周而复始地不断进行着的，终于在矿区某一地方形成金晶核。该金核又被微生物所包围，又不断地吸附沉淀周围环境中的可溶性金。经过数年的循环往复作用，金核便逐渐“增生”，最终形成肉眼可见的明金——初始砂金。砂金的电子探针测试结果表明，砂金实际上是由较小的金粒连结而成，在其结合部位，往往出现网状、乳头状、海绵状等细微结构，这些结构，明显地带着“增生”的痕迹。实验证明，细砂金被某些微生物所产生的粘液物质所包裹粘合，同时这些微生物又以其所产生的菌蛋白、粘液等对周围环境中的可溶性金络离子不断地进行吸附沉淀，使砂金不断“增生”。各砂金又以其“增生”部分相连接，最终形成大型块金——狗头金。

Hirner等（1990）详细研究了近代沉积物中有机组分对金属元素的富集系数，发现在腐殖酸、干酪根和氯仿沥青“A”这三大组分中，多金属和贵金属元素主要是富集在腐殖酸中，其次是干酪根中。在佛罗里达西北部海岸带沉积物中，也发现富含腐殖质的沉积物，其中多金属元素丰度比不含腐殖质的沉积物要高十倍到几千倍。腐殖酸在自然界分布十分广阔，化学反应性能很强，在土壤、地表水体和沉积物中占有机质总量的60%~80%，所以说地表环境中所有化学和地球化学的反应都直接或间接地受到有机化合物的影响。卢家烂等（1988）进行了腐殖酸与金属元素的相互作用实验，结果证明，富啡酸和胡敏酸对铅锌等多金属元素有很强的结合能力，每克腐殖酸可结合和携带140~300mg Pb(Zn)。实验测定，当pH值在5~8区间，0.02mol CaCl₂和1%富啡酸混合溶液中，40%~94% Pb²⁺(Zn²⁺)与富啡酸结合在一起。腐殖酸具有络合物化学和胶体化学的双重特性，在溶液pH=8时，与富啡酸结合的总铅量中，以络合物形式结合的Pb²⁺量（占67%）大于以吸附和离子交换形式结合的Pb²⁺量（占32%）；而在胡敏酸与Zn²⁺结合的总金属量中，吸附和离子交换方式结合的Zn²⁺量（65%），远高于以络合物和螯合物形式结合的Zn²⁺量（34%）。因此，腐殖酸与多金属元素结合的方式和结合力强度，将影响到沉积成岩和埋藏变质阶段多金属元素的循环和再分配过程。实验还表明，腐殖酸结合铅、锌的能力受溶液pH值和有机质成熟度的影响。在低成熟阶段结合方式以络合物和螯合物为主，在高成熟阶段结合的方式以离子吸附为主。近年来人们强调了水溶有机质成分和石油对金属元素的迁移和富集作用。卢家烂等（1988）通过模拟实验，研究了铅锌元素在油田卤水和醋酸溶液中的溶解度及热稳定性，以及石油的生成和初次运移过程对铅、锌等元素的活化和迁移的作用。金与有机质关系的地球化学实验模拟近年来也取得一定进展，80年代以前关于金的有机地球化学实验，大多以表生条件下腐殖酸对金的吸附、配合等为主。Baker（1978）作了在各种物理化学条件下腐殖酸对金的溶解实验；Marinsky等（1986）所作的实验表明，腐殖酸与二价金属形成的配合物的稳定性，通常极少偏离Irving-Williams次序（Irving and Williams, 1948）：



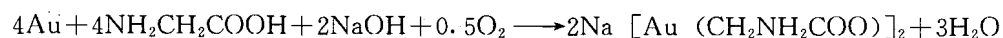
卢家烂等(1988)、王恩德和关广岳(1993)利用腐殖酸进行了溶金实验,腐殖酸可以溶解和“捕获”原岩(矿)所释放的金,这为腐殖酸迁移金提供了途径。王恩德等的实验证明富啡酸对金、银具有显著的螯合作用,可形成稳定的腐殖酸-金螯合物;胡敏酸对金、银有强烈的吸附性,其吸附能力高于高岭土、针铁矿、赤铁矿及 SiO_2 胶体。金矿床内有机质对金的富集不仅是腐殖酸的吸附作用,而且更重要的是形成金有机质络合物同迁移、共沉淀,使金矿形成。刘金钟根据涂光炽、傅家谟的石油与某些金属矿床成矿相关性理论,用实验方法探讨了有机质对岩石中金的淋滤作用、石油对水溶液中金的萃取作用、有机质热演化生油对金的活化迁移作用、有机质对金的还原作用等方面,探讨了金与有机质的相互作用方式及机理。张志坚(1997)利用稀释的原油(胜利油田的原油)对矿石中的金进行萃取、活化,并在此基础上率先在国内进行了金呈气体迁移的可能性试验。结果表明,在一定温度条件下金呈气体迁移的量是不可忽视的。金-有机络合物以气体方式迁移不仅丰富了金属矿床成矿理论,而且这也可能是微细浸染型金矿形成的一种重要方式。

(四) 应用研究方面的进展

某些生物、有机质可以作为找矿的重要标志。近年来利用微生物(细菌)对覆盖地区隐伏金属矿床进行找矿,是勘查地球化学的一种新方法。土壤中蜡样芽孢杆菌找矿法是微生物地球化学探矿方法之一。在隐伏金属矿床的上覆土壤中,重金属的富集与抗青霉素的蜡样芽孢杆菌有密切关系。土壤中其他细菌(微生物)会被金属离子杀死,或被土壤中耐金属真菌所产生的青霉素和其他抗菌素杀死,而蜡样芽孢杆菌则具有较强的抗青霉素的能力,因此在一定的地质、地球化学条件下,可以用土壤中蜡样芽孢杆菌计数法在数量异常区寻找金属矿床。国内1991年以来,李珍福等*进行了找金和找铀的试验。王红梅、汤显春等*近年来也在我国滇黔桂和陕甘川微细浸染型金矿区,对蜡样芽孢杆菌探矿法进行了对比性试验研究,收到了较好的效果。

利用微生物或它们的代谢产物对某些金属或矿物具有氧化、还原、溶解、吸附(吸收)的特性,对矿石、精矿或残渣中的有用金属进行溶浸、提取,或者是去除矿石和精矿中有害组分。这种工艺有人称为生物选矿或生物冶金,国际上通称为生物湿法冶金。1958年美国肯涅柯特(Kennecott)铜矿公司首次采用氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)堆浸铜矿获得成功并投入大规模工业生产。自此,生物湿法冶金在一些低品位铜矿、某些铀矿以及难浸含铂金精矿和金矿石的选矿、冶炼中相继获得了工业应用。

现在国际上公认此工艺对低品位硫化矿石、难选冶毒砂型金矿的资源开发是行之有效的工艺。南非等国研究证明,可用某些细菌从含金红土及矿石中浸金。实验结果表明,用植物肥大病菌属获得的 $26\sim 28^\circ\text{C}$ 温度下的红土浸金溶液含金达 $1\sim 1.5\text{mg/L}$;用芽孢杆菌属浸21天后,含金达 $0.1\sim 1.0\text{mg/L}$,而用异养菌浸293天后,金提取率达82%。前苏联科学家对溶金菌的研究及应用做了大量工作,利用巨大芽孢杆菌(*B. anthracoides*)、肠膜芽孢杆菌、液化假单胞杆菌(*P. liquefaciens*)等进行了微细粒浸染金浸出研究,经2~3个月处理,细胞培养液中金浓度达 $1.5\sim 2.15\text{mg/L}$;用尿素、二代磷酸、葡萄糖等培养的细菌液可使金的溶解能力提高5~70倍,浸20天后,溶液含金量达 $3\sim 5\text{mg/L}$ 。他们对自然界广泛存在的四类微生物的浸金能力进行了对比,发现放线菌从矿石中提取金的能力最强,能从泥质矿石中吞食和积累5.7%的金,从精矿中吞食和积累8%的金。前苏联中央有色金属研究所根据活的杆菌类能优先凝聚胶状金粒的特点进行实验研究,在12小时内一定类型的杆菌能聚集矿石中90%以上的微细粒分散金。进一步的研究证明,微生物溶金能力的产生是由于其新陈代谢产物中含有大量氨基酸所致。特别是天冬氨酸、丝氨酸、组氨酸和谷氨酸等能与金配合,生成阴离子配合物。如甘氨酸的溶金反应为:



前苏联 Миннеев 等还研究了由微生物合成的有机酸对金的溶解作用,并用这些有机质来浸出金。

80年代以来,我国中科院、地矿、冶金、核工业等系统的科研院所、高等院校,纷纷开展了这方面

* 1997年全国生物成矿、生物找矿、生物选矿学术研讨会论文集

的研究,取得了不少成果。在安徽铜官山、甘肃白银厂、湖南水口山、江西德兴进行了细菌堆浸铜矿的试产,并取得成功,德兴已建厂生产,年可产出铜数千吨;细菌浸铀已试产成功;细菌氧化-氰化提金工艺在广西、河北、青海试验均获成功,已进入试生产阶段;陕西双王金矿及安家歧金矿微生物堆浸贫金硫化物矿石,浸出率比常规堆浸高30%左右。东北大学还进行了用微生物脱磷富锰的研究。

(五) 研究手段的现代化

随着分析技术的不断提高和现代化,人们对生物有机质的成矿作用认识程度正不断加深。这些现代化的方法、手段主要包括:

1. 核磁共振 (NMR)

核磁共振技术被引入烃源岩成熟度研究,随温度增高芳烃区的强度增加,而脂肪烃区的强度明显降低。核磁共振也为研究干酪根结构提供了一条新途径。

2. 离子探针 (IMMA)

离子探针也称二次离子质谱 (SIMA),可用于微区成分分析。该仪器分辨率强、灵敏度高、可测定所有元素,并能分析化合物的组成及结构等。现已有人用离子探针 for 煤中显微组分进行了研究,李树枝等用离子探针对于干酪根中菌解无定形碳和无定形体进行了研究,认为 CH/C 和 CH_3/C 可以作为衡量无定形体产烃能力的指标。离子探针应用于有机岩石学研究前景十分广阔。

3. 质子探针 (PIXE)

质子探针是一种多元素分析方法。它是用带电粒子轰击待测样品靶,与靶原子相互作用,激发出代表某种原子特征的 X-射线。通过对 X 谱线能量和强度的测定,就能识别有机质中微量元素的种类和元素的含量。它具有分析元素多、取样量少、分析速度快及灵敏度高 (比电子探针高一、二个数量级) 等特点。

4. 色谱-质谱联机 (GC-MS)

这种色质联机,主要用于进行矿石或成矿流体抽提物 (有机质) 的生物标志化合物分析。根据这些生物标志化合物提供的信息,帮助我们分析有机质的来源。

5. 显微傅立叶转换红外光谱 (Micro-FTIR)

该仪器能在 $2.5\sim 14.5\mu\text{m}$ 红外波长范围内扫描 $20\times 20\mu\text{m}^2$ 这样小的面积,所得结果是多组分的混合信息。它主要用于分析有机质的化学结构,有利于更好地评价各组分结构在热演化过程中的变化。

6. 显微激光拉曼光谱 (Micro-Raman)

红外光谱是吸收光谱,而拉曼光谱是散射光谱。它们与分子的振动-转动能级的跃迁有关,因而能够推断溶液中络合物的化学式和测定反应平衡常数等。拉曼光谱的一个重要优点是较易研究波数低的光谱,因此适于研究溶液中的无机络合物和金属-有机络合物等。拉曼光谱是根据多原子结构的振动光谱特征建立起来的一种微区分析方法,测点直径可小到 $1\sim 5\mu\text{m}$,与红外光谱相比,可提供更多的信息。红外光谱与拉曼光谱技术相互结合用以探讨水热流体结构是最佳的选择。

7. 激光显微热解色质联机

该方法是将激光束引入光学显微镜,打在所观察的显微组分上,使之在高温下热解,随后将热解产物引入激光显微热解色质联机进行分析。这是微区分析的较新方法,在第九届国际有机岩石学会议 (1992) 上 Stout 报道,利用该仪器研究了几种单组分的成烃性及化学性质。

8. 电子显微镜

电子显微镜能够检测小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒,是研究干酪根中各种变质程度的有机质和矿物的一种非常有效的工具。

综上所述,新技术、新手段的应用,对矿床中生物有机质种类、生物标志化合物、有机质含量、有机流体的来源等的分析有十分重要的作用,也为生物成矿系统研究理论的完善创造了有利条件。

三、研究思想体系——生物成矿系统论

学科的产生和发展都是从注意到一些难以解释和回答的现象和问题开始的。在生物成矿作用的研究过程中，正是下述问题和现象，推动我们形成了生物成矿系统论。这些问题包括：

(1) 除了直接由生物遗体及其分解产物形成的矿产如煤、石油等外，还有一些矿产虽然不显示很多直接的生物证据，但其组成结构与形成过程与生物密切相关，例如南非兰德金矿、深海锰结核、狗头金等。它们的形成用单纯的化学作用不能解释，必须用生物化学过程来回答。这就提出了微生物与有机质的水化学作用问题。

(2) 大多数金属热液矿床形成在一百多度到三百多度的热水溶液中，在这样的温度条件下大多数生物已不能存活，生物有机质在成矿流体中能否存在？以何种形式参与成矿作用？矿床学研究常常需要回答的一个问题就是金属元素的来源。不少人认为，流体与围岩作用可以释放出其中所含的微量和痕量金属元素，使之在有利地段富集成矿。在一百多度到三百多度温度条件下，什么样的流体能最好地溶解并释放出地层中所含的金属元素？这就提出了有机流体的作用问题。

(3) 全球范围内普遍发现汞矿与油气盆地关系密切。在许多矿区，例如滇黔桂低温金汞锑多金属地区，容矿地层往往富含有机质，但是金属矿床并不产出在有机质极为丰富的煤层或古油气藏中。相反，如金属元素成矿，则煤和油气不能成矿和成藏，而油气和煤丰富，则金属往往不能聚集成矿。这种既相关又不相关的现象是什么原因？

(4) 为什么不少大型、超大型矿床、矿带或矿集区产出在盆地-造山带的边缘？生物成矿作用与盆-山构造是什么关系？

正是上述问题的提出，促使我们思考并提出生物成矿系统论。

为了更好地研究生物成矿作用，回答研究中出现的一些问题以及解释某些特殊的地质现象，我们认为必须用联系的而不是孤立的观点来研究生物、有机质和无机质、金属矿床与油气藏的关系；用发展的而不是停止的观点来探讨生物在成岩、成矿不同阶段的演化及其对成矿的影响；用运动的而不是静止的观点来研究成矿作用中物质与能量的关系问题。因此，我们提出了生物成矿系统论（Bio-metallogenetic System）即生物-有机质-流体成矿系统（Organism - organic matter - fluid Metallogenetic System，或OOFMS），用发展的、联系的和运动的观点来讨论“生物”成矿的问题。我们认为生物成矿系统，应该包括以下三个子系统：

- (1) 生物-有机质-有机流体演化子系统，这是该系统的物质部分；
- (2) 活化迁移沉淀富集成矿子系统或简称生物成矿子系统，这是该系统物质与能量交换的结果；
- (3) 盆-山构造演化子系统，这是该系统的动力源或能量。

在生物成矿系统论中，流体是贯穿其中的一条主线，是三个子系统之间相互作用的纽带。流体不仅直接影响了系统中物质和能量的运动传输，而且决定了系统中物质和能量的交换和再分配。它们之间的关系可用总体研究思路略图（图 1-1）表示。总之，成岩成矿作用使生物形成有机质和有机流体；有机

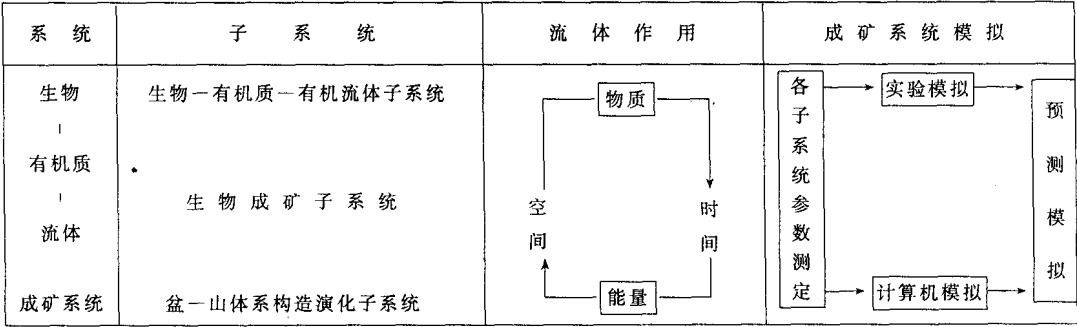


图1-1 研究思路略图

流体和有机酸可使金属元素活化进入流体；构造的演化驱使流体大规模运动；构造岩浆活动使温度升高，有机质又热解，并发生吸附还原或沉淀聚集致使金属元素富集成矿。地质作用的不断发展演化，不同的矿床、不同成矿阶段，三个子系统之间的耦合关系、存在形式和作用大小是我们研究的主要内容。

(一) 生物-有机质-有机流体子系统

1. 生物

已知生物体中含 60 余种化学元素。地球生命物质的平均成分见表 1-1。

表 1-1 地球生命物质的平均成分
(转引自南京大学地质学系, 1979)

元 素	在有机体中的平均含量 ($w_B\%$)	元 素	在有机体中的平均含量 ($w_B\%$)	元 素	在有机体中的平均含量 ($w_B\%$)
O	70.0	Ti	8×10^{-4}	Ge	$n \times 10^{-4}$
C	18.0	F	5×10^{-4}	Ni	5×10^{-5}
H	10.5	Zn	5×10^{-4}	Pb	5×10^{-5}
Na	5×10^{-1}	Rb	5×10^{-4}	Sn	5×10^{-5}
K	3×10^{-1}	Cu	2×10^{-4}	As	3×10^{-5}
Si	2×10^{-1}	V	$n \times 10^{-4}$	Li	2×10^{-5}
Fe	1×10^{-2}	Cr	$n \times 10^{-4}$	Y	1×10^{-5}
Al	5×10^{-3}	Br	1.5×10^{-4}	Cs	1×10^{-5}
Ba	3×10^{-3}	Mg	4×10^{-2}	Se	$< 10^{-6}$
Sr	2×10^{-3}	P	7×10^{-2}	U	$< 10^{-6}$
Mo	1×10^{-3}	S	5×10^{-2}	Hg	$n \times 10^{-6}$
B	1×10^{-3}	N	3×10^{-1}	Ra	$n \times 10^{-12}$
TR	$n \times 10^{-3}$	Cl	2×10^{-2}		

生物在其生命过程中，一方面从周围介质吸取上述元素，一方面又把另一些元素交还到介质中去，使地壳中的元素发生迁移和重新分配。从作用的经常性和强烈程度看，生物地球化学作用是地表最强的化学作用。

生物圈有机碳总量为 $3 \times 10^{12}t$ 。生物圈的质量与其他圈层比是很小的。水圈、大气圈和生物圈的相对重量比值为：水圈 69 100、大气圈 300、生物圈 1。生物圈质量虽小，却有比其他圈迅速得多的循环速度，即生物繁殖速度。如某些细菌经 22 分钟即分裂一次，在适宜条件下，只要经过 36 小时就能把地球表面盖上一层。微生物大多数都有惊人的繁殖速度，所以它们的地球化学作用很大。

地球上最大的生物量存在于海洋，海洋生物量的主体是浮游植物，其次是吞食浮游植物的浮游动物，再次为食肉动物。据对一些海区的估计，它们的重量比大约为 250 : 50 : 1。浮游植物的数量，随月份、纬度和离海远近可有数百倍幅度的变化，因而只能作大致的估计。一般估算，由浮游植物构成的初级生产力的年总生产量为 $(25 \sim 30) \times 10^9 t$ 碳。每一毫克碳相当于湿浮游生物 37 毫克。这种相当值叫浮游生物当量。与之同时，依靠光合作用消耗这么多吨碳的浮游生物还消耗大量氮、磷、氧等，它们的浮游生物当量为：碳 1mg，氮 0.18mg，磷 0.024mg，植物色素 305mg，湿浮游生物 37mg，干浮游生物 2.3mg，沉积体积 0.7g，排带体积 0.18mg，氧当量 1.9ml。

生物死亡遗体分解后，上述元素的相当一部分沉淀于海底，另一部分逸入大气圈。由此可见，生物对于碳、氮、磷（及硫）的地球化学循环起很大作用。

微生物有吸取元素的强大能力。它们的吸取机制大致是两种，即化学吸附作用和物理吸附作用。化学吸附作用分泌有机酸或可溶性胶体，并与金属离子相互作用，形成金属-有机络合物；物理吸附作用可分为胞内固定金属和细胞壁固定金属。胞内固定金属的过程首先是由于物理化学作用，金属被吸附到细胞表面接着依赖能量转移系统运送金属进入细胞内。细胞壁则可粘合金属，其能力与细胞壁的化学成分与结构有关。

2. 有机质

一个生活的细胞，在不断通过细胞膜从外界摄取营养物质的同时，又要不断地将未被利用和细胞分

泌的物质（如各种激素、胞外酶等）排到胞外。由活细胞排向胞外的有机质，是水环境中可溶有机质的重要组成部分，其数量是相当可观的。据统计，在任何时间，海水中所含有机质的总量，要比海洋中活生物所含有机质之量大好几倍（Sverdrup 等，1946）。水循环中的大部分有机质将通过异氧微生物的活动而迅速再循环成 CO_2 和 H_2O ，但有些可溶的有机化合物可在水中存在较长时间（Duursma, 1965）。由于有机质的络合性，对成矿元素的活化迁移和富集都可能产生深刻的影响。

生物死亡后转变成各种有机质，有机质大量分散地保存在地球表层各个层圈中（大气圈、水圈、岩石圈），在地球深部，则在温压增高条件下变成碳。以有机质形式保存的部分中，其中一小部分，在合适的条件下转化为化石燃料。现在估计地球保存的化石燃料量为：煤及褐煤 $7.6 \times 10^{12} \text{t}$ ，天然气 $283 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，石油 $2\,000 \times 10^9$ 桶，沥青砂中的油 300×10^9 桶，油页岩中的油 190×10^9 桶（Hubbert, 1971）。有机质在被埋藏的储层中，对地温的反应是很明显的。油母物质大致在 121°C 时，就开始转化为较轻的烃类；温度继续升高演化，最后的产物是干气。在地表及地下循环的各种流体，大部分均含有有机质。有机质能以各种方式参与许多矿床的形成。由于有机质热稳定性低，尽管许多变质程度较高的金属矿床中，有机质含量很低，但有机质在成矿过程中的作用应远比我们所认识的大得多。有机质所具有的一系列性质如胶体性、还原性、络合性、吸附性等为它在成矿元素的活化、迁移及聚集成矿诸方面起重要作用奠定了基础。在成矿元素活化方面，腐殖酸、氨基酸等起主要作用，因为它们具有能与一系列金属元素形成高稳定性螯合物的官能团，如羧基、羟基或氨基等。有机质参与成矿元素的迁移至少有两种形式，一是以胶体形式，二是以金属有机络合物形式。有机质在成矿元素最后聚集成矿中也有多方面的作用，有机质本身的吸附作用就能富集许多元素。另外，有机质的还原作用可使许多元素沉淀下来。有机质的放热反应还能为层控矿床的形成提供部分热源。

3. 有机流体

凡含有有机质的气态和液态流体都称有机流体。它们存在于岩石圈的孔隙裂隙中。成分含烃类、非烃类化合物和有机酸等，但没有确定的化学成分和物理常数。石油、天然气、油田水都是有机流体，但自然界中的有机流体的含义比它们广泛得多。有机质在各种地质作用过程中，特别是受构造热事件的影响，在温度增高的条件下将发生两极分化。一部分由于受热而降解，生成 H_2O 、 CO_2 、 N_2 、 H_2S 、 CH_4 及其他气态和液态烃类物质，也就是原先在低温条件下迁移的金属-有机络合物（螯合物、配合物）或其他呈胶体吸附的物质，当温度增高后，大分子有机质热裂解成分子量小的简单有机和无机物质。另一部分则在热降解的同时缩聚成含碳更高、含氧更少、分子量更大的产物，如沥青和高成熟干酪根。从上述变化不难看出，在较低温度条件下有机质使金属元素发生活化迁移；而在较高温度条件下，有机质发生裂解形成金属元素的沉淀。在此同时，一方面形成富含有机质的流体，含 CO_2 、 H_2O 、 H_2S 、 CH_4 等成分，另一方面形成含高碳的缩聚产物。这种成矿机制可以简单概括为“低温活化迁移高温沉淀成矿”，决定这种变化的主要因素为构造热事件。这就将有机质流体成矿作用和构造岩浆活动有机地结合起来。

（二）生物成矿作用子系统

1. 生命活动的成矿作用

生命在地球上的产生，为地球表层进行的物质运动增加了生物的反应形式，对岩石圈、水圈和大气圈的演化造成巨大影响。就沉积岩石圈的形成而论，早期广泛覆盖地表的条带状硅铁建造，以及后来在不同地质时期沉积形成的碳酸盐建造、黑色岩系、硅质岩及煤，无不与生命活动有关。再如，嗜铁、嗜磷、嗜铜、嗜锰等细菌以及藻类和高等植物，死亡以后可堆积形成矿床。这类矿床一般都经过成岩演变或流体变质过程，去除了挥发组分，留下有用元素堆积成矿，例如，生物灰岩、硅藻土、藻磷块岩、鸟粪磷矿、藻锰矿、叠层石铜矿、鲕—肾状赤铁矿、煤、油页岩及硫磺矿床等。广而言之，赋存于沉积岩石圈内的沉积及沉积-改造型矿产的形成，无疑与生命活动有关。

研究发现，生命活动在沉积及沉积-改造型矿产形成中的作用，主要表现为下列几方面：①通过吸收和吸附作用，使成矿元素在细胞内或细胞外聚集；②通过改变环境的物理化学条件，使成矿元素活化或沉淀；③通过新陈代谢作用，使成矿元素氧化或还原。

A. 通过吸收和吸附作用，使成矿元素聚集

a. 巨大的富集能力

生物在其生存期间，可不断地从周围介质选择性地吸收、吸附某些元素，存储于生物体内。生物对许多金属元素（Ag、Al、Au、Ba、Be、Bi、Cd、Cr、Co、Cs、Cu、Fe、Ga、Mn、Ni、Pb、Ti、V、Zn等）都具有惊人的富集能力，富集系数从几百到几十万（表1-2、1-3），有的元素甚至可以超过27万倍。据粗略计算，每年由于生物活动从大洋中迁走大约 5×10^{14} g氧化硅，因此，生物是控制海水中氧化硅的主要因素；浮游动物每年可以迁移 2×10^{11} g铅，这大约相当于迁移进入各大洋中铅总量的50%，马尾藻（*Sargassum nodosum*）吸收的Au可达其细胞干重的42%（黄淑惠，1991）；加利福尼亚非格罗阿湖的藻席含Au达18kg/t（Hoffman and Brooker, 1982）；假单胞菌（*Pseudomonas maltophilia*）与金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）的混合物固定的Ag占细胞干重的30%；尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum*）吸收的Al占菌体重量的13.2%；点青霉菌吸收的Cu可达干菌体重的8%（殷鸿福等，1994）。

表1-2 海生植物中某些元素的丰度值

（据 P. A. Trudinger, 1976）

元素	海水中的丰度值 ($\times 10^{-6}$)	海生植物中的丰度 ($\times 10^{-6}$)	富集 系数	元素	海水中的丰度值 ($\times 10^{-6}$)	海生植物中的丰度 ($\times 10^{-6}$)	富集 系数
Ni	0.005	3.0	600	Se	0.000 09	0.8	8 800
I	0.06	30~1 500	500~25 000	As	0.003	30	10 000
Ag	0.003	0.25	830	C	28	345 000	12 300
V	0.002	2.0	1 000	Zn	0.01	150	15 000
Hg	0.000 03	0.03	1 000	Ti	0.001	12~80	12 000~8 000
Au	0.000 01	0.012	1 200	Cr	0.000 05	1.0	20 000
Co	0.003	0.7	2 300	P	0.07	3 500	50 000
Bi	0.000 017	0.06	350	Fe	0.01	700	70 000
Cu	0.003	11	3 700	Pb	0.000 01	8.0	26 700
Cd	0.000 1	0.4	4 000				

陆生生物吸收聚集金属的能力也十分惊人，如陆生植物中的被子植物含Zn约 $1\,600 \times 10^{-6}$ ，真菌含Zn 150×10^{-6} ，一种蕈科植物含Zn高达 $40\,000 \times 10^{-6}$ ，又如金龟子体内含Au达几万 $\times 10^{-9}$ 等。陆生植物富集金属的机制比较单一，主要是通过根部从土壤和岩石中吸取金属，然后输送到茎部和叶内。相反，水生生物富集金属的方式却很复杂，是目前生物成矿作用研究的重要问题。表1-3显示几种藻类吸附 Au^{3+} 的能力。

表1-3 几种藻细胞吸附 Au^{3+} 的量

（转引自黄淑惠，1991）

在不同的环境和条件下，菌藻对金属的富集系数有较大变化，并存在选择吸附作用，即有选择地从介质中吸取它们需要的离子和化合物。对于某些细菌而言，不仅应该把它们视为活的或富有生命力的个体，而且还应该视为具有胶体特征的微粒。鉴于具有胶体的属性，因而可以吸附各种成矿物质使之迁移和富集。

藻类名称	吸附量 (Au^{3+} mg/g 干细胞)
掌状红皮藻 <i>Rhodomenia plamala</i>	40.11
螺旋藻 <i>Spirulina plalesis</i>	70.68
红绿藻 <i>Cyanidium caldarium</i>	83.15
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	152.00
蛋白小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	97.65
漂浮马尾藻 <i>Sargassum nodosum</i>	420.00

原核生物、真菌和植物可以通过吸收和吸附作用，直接从环境中聚集成矿元素。动物尤其是多细胞动物，主要是通过食物链间接聚集成