

• 关广岳 著 •

金属矿床氧化带微生物 地球化学

科学出版社



金属矿床氧化带微生物地球化学

关广岳 著

国家教委博士点基金项目
冶金工业部资助项目

—

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书是1987年以来,作者在指导几位博士研究生开展生物成矿作用研究方面所取得的具体成果。全书分为六章,前四章为基础部分,着重介绍和分析了影响表生成矿作用的地质、地理、土壤与生物等诸多因素;系统地探讨了以混沌理论为基础的成矿动力系统的自组织作用、必然性与随机性的关系,并以文字和图解形式讨论了作者提出的四种成矿区的特征;后两章分别以硫化物矿床氧化带和红土化成矿作用为对象,以实践为基础,全面地阐述了氧化带金矿与风化壳铁、锰矿形成过程中微生物参与的重要性,修正了传统的氧化模式。

本书可供矿床学、地球化学、微生物学等领域的科研工作者,以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿床氧化带微生物地球化学/关广岳著. -北京:科学出版社, 2000
ISBN 7-03-007791-1

I. 金… II. 关… III. 金属矿床-氧化带-生物化学; 地球化学
IV. P618.2

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第32118号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2000年1月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—800 字数:330 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

目 录

绪论	1
第 1 章 混沌与成矿动力系统	4
1.1 无序-有序 (disorder-order) 的转变	5
1.2 自组织作用 (self-organization)	7
1.3 系统演化中的随机性	9
1.4 成矿动力系统	10
第 2 章 地球表层及其影响因素的分析	14
2.1 气候因素及中国气候特征	16
2.2 降水与蒸发作用	19
2.3 中国气候的自然演化史	21
2.4 喜马拉雅运动与中国现代自然地理环境	23
2.5 地形条件	31
第 3 章 成矿元素在表生条件下的地球化学行为	33
3.1 影响表生成矿的主要物理化学因素	33
3.1.1 温度因素	33
3.1.2 水的作用——无水不成矿	34
3.1.3 酸-碱反应 (氢离子转移) 和氧化-还原反应 (电子转移)	36
3.1.4 大气中氧和二氧化碳的作用	42
3.1.5 胶体及吸附作用	46
3.1.6 有机质的作用	49
3.2 成矿元素在表生条件下活化、迁移和聚集	53
第 4 章 微生物在表生环境中对金属氧化成矿的控制作用	57
4.1 微生物的生态系统	59
4.1.1 微生物在自然界中的空间分布	60
4.1.2 微生物在自然界物质循环中的作用	61
4.2 细菌的构造和营养类型	64
4.2.1 好氧、产氧的光合细菌——光能自养型蓝细菌 (Cyanobacteria)	67
4.2.2 化能自养型好氧菌——硫杆菌属 (Thiobacillus)	70
4.2.3 铁细菌 (Iron Bacteria)	72
4.3 生物氧化——氧化磷酸化过程	73
4.3.1 呼吸链——电子传递系统	74
4.3.2 生物化学能和 ATP	76
4.4 生物酶的催化作用	78
第 5 章 硫化物矿床的微生物氧化作用	81
5.1 硫化物矿物学及其在氧化带中的演变	82

5.2 氧化带的分带性	87
5.2.1 各种硫化物在氧化带中的氧化方式	88
5.2.2 硫化矿物在氧化-还原反应中的变化及次生硫化物富集亚带的形成	91
5.2.3 次生氧化富集亚带的出现	91
5.3 氧化-还原反应	93
5.3.1 Eh-pH图解	93
5.3.2 P_{O_2} - P_{S_2} 图解	96
5.4 含金硫化物矿床氧化带中金的氧化机制	98
5.4.1 金的成色及其在氧化带中的增高现象	104
5.4.2 金的粒度及其在氧化带中的增大机制	117
5.5 硫化物矿床氧化带中微生物的氧化机制	124
5.5.1 传统的单一化学氧化-还原反应模式的修正	127
5.5.2 微生物的氧化机制	131
5.5.3 硫化物矿床氧化过程中微生物的净化作用	133
5.6 不同气候区硫化物矿床氧化带的分带特征	135
第6章 含矿岩的微生物氧化过程	145
6.1 砖红壤与红土化作用	146
6.2 红土化过程中硅-铝-铁的化学演化	154
6.3 条带状铁硅建造(BIF)的红土化过程	159
6.3.1 前寒武纪条带状铁硅建造(BIF)——风化壳型富铁矿床的矿源岩	159
6.3.2 磁铁矿的假象赤铁矿化和二氧化硅的淋滤	166
6.4 碳酸锰矿床的微生物氧化作用	177
6.4.1 锰矿石的主要矿物类型	179
6.4.2 锰-铁-磷等元素在表生环境中地球化学行为	182
6.4.3 锰-铁碳酸盐矿石的氧化作用	189
6.4.4 微生物对碳酸锰矿石的氧化机制	196
6.5 红土型金矿床的形成机制	208
参考文献	217
后记	223

绪 论

地球表面是指地球大气圈、水圈、生物圈与岩石圈接触渗透,相互影响,相互作用的自然界面。在这个界面上,表生地质系统与环境持续不断地进行着能量、物质和信息的交换。太阳辐射占地球表层从环境中输入总能量的 99.98%,可以认为是表生系统的唯一能源。据 Frolich 1977 年测定,在当前地球圈层结构条件下,太阳辐射能只有一半左右到达地球表面,其余约 35% 被反射回太空,15% 被大气圈所吸收。因此,整个地球表层(包括海、陆在内)可以获取的太阳能约为 $8 \times 10^{12} \text{ J/s}$,用来维持平均约 15°C (288K) 的地表温度 (Schopf, 1980)。这是由于大气和水的循环作用极大地加强了地球获取太阳能的能力的结果。绿色植物则通过光合作用有效地固定了这些能量。当其它圈层尚未形成,只有岩石圈孑然一身时,据 Fleagle 和 Businger 对地表温度估计,地球演化的早期阶段(相当于目前月球的结构)比现在低约 35°C ,即 -20°C (253K)。46 亿年前的地球表面昼夜温差极大,恐怕也只有月球表面昼夜高达 150°C 的骤变差可比拟 (Henderson, 1982)。

地球层圈由早期的单一岩石圈发展到岩石圈、大气圈和水圈三圈并存,最后出现生物圈的演化历程,导致物质形态和结构由简单到复杂、由低级到高级、由结构单一到结构多样的上升性演化或进化。从物质形态来看,地球范围内首先出现的是最低级、最简单的物理物质形态,然后依次产生越来越复杂的化学物质形态和生命物质形态,最后出现人类社会形态 (柳树滋, 1993)。这是一种不可逆的、有序度递增的演变,是自然系统的正向发展,是不以人们意志为转移的普遍规律。在地球表层存在的大气环流系统、海洋系统、地质-地理系统和生物系统等莫不严格地遵守这个法则,虽然在总的演化进程中不可避免地会出现某些曲折,甚至在个别时间或个别地带出现逆转现象,但也不过是地球不断前进的总旅途中些许小插曲而已。对表生地质系统而言,由于周围环境的差异,诸如海陆、气候、地形等自然因素的影响,在众多的物质运动形式(机械的、物理的、化学的和生物的)中必然会出现甲地中以此为主,乙地中以彼为主。结果各种化学元素在表生地质作用下具有错综复杂和丰富多采的地球化学行为,产生出组成复杂、深雕细刻、脉络清晰和引人入胜的自然景观。因此,无论从哪个角度来分析,远远不是地球的内生过程望其项背的。表生地质系统是在地表或近地表条件下由于大气、降水和生物等营力作用于各种原生的岩体(火成的、沉积的、变质的)或矿体(金属的、非金属的、可燃性的),从而在地质体的表层部位产生薄厚不等的风化层(壳)或氧化带的次生氧化系统。可以认为这是对新环境不能适应的旧结构形式的破坏和新结构形式的建立,变不稳定状态为准稳定状态。这种变化表明了作为岩石圈组成部分的地质体,在氧化过程中自发地走向热力学稳定状态,这种次生变化是任何自然物体从还原环境中进入生物圈范围都是在所难免的事情,从桎梏封闭到对外开放必然发生的自然过程。表生地质系统属典型的开放系统,可以定义为“化学的和生物学的成分通过岩体或矿体串接起

来的过程-反应系统，是属于分子-凝聚态物质层次的宏观系统”。因此，成矿系统与其它自然系统一样，完全具备在不断变化的环境中保护自己和改造自己的天赋能力，虽然这种能力与生物系统相比显得不那样明显，而且有些迟钝，但终究是存在的。

自从地球上有了生物以后，就为地球演化补充了新的日益重要的能源——生物能。正如著名地球化学家维尔纳茨基所说的那样，在地球表面不存在比整个活的有机体更经常地起作用，因而就其最终结果来说应是更强大的化学力。他指出：“我们愈研究生物圈的化学现象就愈坚信，在地球上不存在不依赖于生命的事件”（Vernadskii, 1989）。现代大气圈就是绿色植物光合作用的产物。植物将太阳能转化为生物能，通过生物链供养动物界，其中一部分动物和植物还把自身的能量通过矿化作用变成煤、石油、天然气等能源矿产。长期以来，研究表生地质作用往往只注意机械的、物理的、化学的作用因素，对有机质的效应总是估计不足，或者置之不理，显然这是很不公平的。

事实上，作为有机物的生物和作为无机物的矿物，以及介于两者之间的能源矿物是构成地壳的主体，三者之间存在着千丝万缕的联系。有机质矿化为无机质是众所周知的反应，由土壤（疏松的岩石）构成的广阔大地，又是生物繁衍生息的场所。这是生态学研究的主要内容之一。联合国科教文组织要求把生态学的知识普及到每一个人，可见这门学科多么重要了。从学科的定义出发，生态学是研究各种生物的生存条件、生物群落与环境系统之间相互作用的过程及其规律的科学（徐汝梅，1987），如果将定义中的“生物”二字换成“矿物”，这个定义完全可以为矿床学者所接受。所以不揣冒昧地提出“矿床学”可以称为“矿态学”（Mineral-Ecology），绝对没有改个名字的妄想，只想引起人们注意生物在成矿过程中的作用不容忽视。著者杜撰的这个名词（关广岳，1996），就是强调两者在研究方法上的共性，希望能促使两个不同学科的交流 and 有利于矿床学的发展。例如，生物体之所以有生命现象是作为整体而存在的特征，而不是构成该整体某一单个生物分子所具备的，整体不等于它的所有部分的机械相加，这就是亚里斯多德早在 2300 年前提出的“整体大于各部分之和”的著名悖论命题。矿体与生物体相比显然是处于较低级的物质形态，却也经历着由原子结合为分子（矿物），多种分子共生或叠加聚集到一定数量，而形成有经济价值矿床的过程。充分表现出众多个体经历斗争的过程，包括成矿系统与周围环境的斗争，系统内部各个分子之间的生死搏斗。就成矿的实际来分析，除去“适者生存”这个自然规律外，还显示出“集腋成裘”的经济化行为。众所周知，生物的生存斗争是异常激烈和极其残酷的，“优胜劣汰”是进化论的核心。矿床学家研究的对象虽属“死物质”，却应从死物质存在的现实探求它们成矿的活过程，这就是“将今论古”的思想方法。事实上，成矿过程也是有声有色和激荡人心的事件，只不过人类没有亲眼见到就是了。现在在红海底热卤水区和东太平洋洋隆“黑烟囱”等地区正在发生的现代铁、锌、铜等硫化物的成矿作用就是极好的例证。虽然表生成矿过程不像内生成矿作用以及火山和地震现象那么迅猛和激烈，显得缓慢而迟钝，但是整个过程进行得完全而彻底，只不过是在人们不知不觉中完成的，而且现在仍然在进行中。

生命活动也要遵循自然秩序，并且属于自组织过程的最高级的表现形式。著名哲学家狄德罗曾经提出过，物质是有感觉的，组成一块石头的分子在积极地寻求某种结合而拒绝别种结合，表明无生命的石头是有感觉的。虽然这仅是哲人的语言，没有得到自然科学家足够的重视，却形象地说明自然界中自组织作用的无所不在的客观事实。生物个

体或种群的“索居”和矿物单体或群体的“独处”都是不存在的（关广岳，1993），《易经》中“方以类聚，物以群分，吉凶生矣”的确是千古名言，是颠扑不破的真理，表达了自然界这个开放大系统的一个根本特征。

第1章 混沌与成矿动力系统

地球化学的动力学研究是继热力学之后又一个重要的新的发展阶段,大约始于 70 年代初期,比较引人注目的应当属于 1973 年在美国弗吉尼亚州 Warrenton 召开的“地球化学迁移和运动学”会议,以及会后编写出版的论文集,集中包括了扩散作用、反应动力学、元素在岩石中的迁移和反应等论文,这可能是较早的有关动力学在地质过程中应用的文章;其后在 1981 年由 Lasaga 等主编的《地球化学过程动力学》的出版,比较系统地论述了动力学的一些基本问题,包括风化和成岩过程的动力学、岩石学中的动力学等,由于 80 年代末期已出版了中译本,对我国地质界可能有一定的影响。但是在地质学科中较早引入动力学或运动学的,多属沉积学的成岩作用、变质岩石学、结晶矿物学和构造地质学等学科,探讨较深入的显然是扩散作用、结晶和重结晶作用等方面。至于矿床学中的应用应该认为是较晚的,多半随着成矿地球化学的兴起,才开始注意到化学热力学过程和动力学计算,稍后注意到晶体化学(量子化学)的重要性,伴随而来的就是对矿床学的研究中从思维方法上排除了长期存在的形象思维和逻辑思维的对立,逐步建立了两种思维形式的统一,即直觉性与逻辑性的统一、特殊(经验)与一般(理论)的统一,达到“互为因果”谁也离不开谁的境界;在研究范围上从单一矿床到矿田再到矿带,研究方法上注意矿床的时空分布规律和成矿演化规律,造成个体与整体的统一,时间与空间的统一,存在(静态)与过程(动态)的统一。认识上和方法上的提高,必然导致将成矿过程作为一个整体的研究方式,这就是“成矿动力系统”所以产生的基础,绝对不是一个偶然出现的事件。

成矿过程是天然介质中呈分散状态的成矿物质在地质作用下活化、迁移和聚集而形成矿床的过程,是成矿系统由无序状态向有序状态演化的过程。这种演化只能出现在系统与环境之间不断地进行物质、能量和信息交换的开放条件,这种情况是所有自然系统全都具备的一个普遍规律。Chechland 曾提出“自然系统是进化形成的、不可还原的整体”的论点。在诸如生物学和地质学等被认为是非严密的科学中,环境(或生境)的因素是举足轻重的,由于所研究的效应极其复杂,通常的人为控制物理的或化学的实验是不可能模拟的,定量模型也是不能解决问题的(Chechland, 1990)。这就是为什么系统论的思想出于哲学家的头脑,而一般系统论的原则却是 Bertalanffy 这位奥地利出生的生物学家在 1948 年提出来的,显然不是一个偶然的事件,是科学发展的必然结果。同在 1948 年由数学家们建立的控制论和信息论也相继问世,奠定了“三论”的基础。这种时间上的巧合,是基于社会 and 科学发展的趋势,完全符合时代的要求(王雨田, 1988)。“三论”的同时问世,使得 Bertalanffy 创建的系统科学的思想和方法更加完善,影响了近 30 年的科学界。由于他们的理论没有解决定量描述与处理等难题,到 70 年代的后期开始陆续出现了 Prigogine 的“耗散结构理论”,Haken 的“协同论”和 Eigen 的“超循环论”等所谓“新三论”,引起全世界从事各个学科领域研究者的高度重视,一时间学

术界言必称“耗散”，语必及“协同”的风气盛行，系统科学开始进入定量的研究阶段，是对自然大系统的整体性、相关性、动态性和有序性的研究，起到极其重要地支持作用。“新三论”等不仅是定性地，而且是定量地探索了由物理系统向生命系统进化的一些内在机制，揭示了自组织系统的一些客观规律性。其中涉及到热力学第二定律的“Maxwell 妖”，通讯和控制论中的“熵”和“生命是什么”等重大问题 (Prigogine et al., 1987)。有兴趣者可以阅读有关专著。在这里只准备就“有序-无序”、“自组织作用”和“系统的演化”等与成矿过程关系密切的课题进行初步探讨和论述。

1.1 无序-有序 (disorder-order) 的转变

化学上将“决定要研究的任何一部分真实世界”定义为系统，未选择作为系统部分的一切事物称为系统的环境。系统可分为三种：孤立的、封闭的和开放的。孤立系统是系统与外界环境既无能量交换又无物质交换，封闭系统仅有能量的交换，而开放系统能量与物质的交换均存在。其中孤立系统是人为的，仅具理论意义，不属于本书讨论的范围。封闭系统是自发地走向无序，例如，一滴墨水滴到清水中就会自动地向周围扩散，最后水的颜色达到均匀，即系统中墨水的浓度在任何部位都是均等的；冷热两个物体接触，通过从热的物体向冷的物体的热传导作用，使得两个物体的温度达到平衡，即系统中各处的温度均等，这两个例子说明系统最终都达到无序状态。事实上，这种状态表明系统已经死亡了，达到了无差别的世界，系统内部物质和能量的运动彻底地消失了，对信息的传递毫无反应，前提是环境对它不加任何干扰。从物理化学来看对应类似宏观现象的平衡态，系统的熵达到极大值。“熵增加原理引入‘时间的箭头’是物理学的巨大进步。在此之前，物理学中的时间只和运动相联系，时间和空间的位置同样只是描述运动的一根坐标轴。运动方程对时间是可逆的……，而熵增加原理引入了时间的不可逆性……。从这种意义上说，时间或过程已经和演化联系起来了。然而熵增加在本质上是一个从有序到无序的过程，它和自然界的进化即从无序到有序的过程是截然相反的。熵增加原理与进化论是两个相反的命题” (Prigogine et al., 1987)。同样地，在封闭条件下，随着温度的降低，水蒸气分子转变为液态的水和固态的冰的过程，系统的有序度在不断增加，它们的物理性质也发生了根本地变化，这在物理化学上称为相变。在相变过程中，系统必须从环境中吸收或释放热量，水分子由气—水—冰的相变显然是放热过程。这种平衡态并非无序状态，也不是系统的熵增大的结果，与前面两个例子恰恰相反。物理化学称之为自由能降低造成的平衡态，著名的 Gibbs 自由能方程为：

$$G = U + PV - TS = H - TS$$

其中：G—自由能；H—系统的能量（在等压条件下是系统的焓）；T—系统的绝对温度 (K)；S—系统的熵。

式中，焓的定义为：

$$H = U + PV$$

其中：U—内能；P—压力；V—体积。

即系统焓的增加等于在恒压下吸收的热（体系只做 PV 功）。

由方程式可见，自由能 G 的极小值所对应的平衡态是系统的能量 H 和熵 S 两个因素相互作用和相互竞争的结果。当系统的温度降低时，其能量和熵都将下降，关键是哪个因素对自由能的影响最大。在低温条件下 H 的下降比 S 的下降对系统影响更大，成为主要因素，这时系统将处于低能量和低熵状态，自由能很小。当温度增高时， H 和 S 都增加的情况下，熵的增加对自由能的贡献将大大地增强，占据主导地位，使得系统处于高熵高能量的状态，大的自由能将有利于形成某种无序状态，例如液态的水，甚至气态的蒸气。矿物由溶液或熔融体冷却结晶成为各种形态的有规律的晶体，都是通过降低温度而产生的有序结构，同样对应着系统自由能最小状态。这种平衡态可以在平衡条件下或孤立的情况下保持不变，表现为系统中既无热传导，又无质点（原子、分子等）的扩散，更无化学反应等宏观现象的发生。在“协同论”中称为“死”结构。Boltzmann 认为系统的熵和组成该体系的微观状态数之间有着密切的联系，他把这种联系表示为：

$$S = k \cdot \ln W$$

式中： k —Boltzmann 常数； W —分布的微观状态数； S —系统的熵。

W 是一个难以理解的概念，是由组成系统的原子的相对位置和速度决定的可能出现的状态数。

Feynman 解释为：“ W 是外观上保持不变，在系统内部可能出现的不同状况的数目”。对于一个有 10^{23} 个分子的系统， W 将是一个极大的数，可达 $10^{10^{23}}$ 数量级。众所周知，一个摩尔的物质至少包含 6×10^{23} 个不同的粒子，这就是我们常说的 Avogadro 常数。Boltzmann 方程对解释这种“死”结构的形成和维持是卓具成效的，对解释平衡相变中无序到有序状态的演化也是成功的。

上述情况在自然界中却很难存在，甚至公认的稳定性极大的矿物晶体也会发生变化，表生氧化作用就是造成许多矿物不稳定的重要因素之一。此外，自然界中还存在另一种有序结构，与上述平衡态相反，属于非平衡态的有序结构。生物系统、大气系统和地质系统等所有自然的演化（进化）系统均属之。这是在远离平衡的条件下，通过与周围环境之间的物质、能量和信息的交换才取得的。它们的表现体系的宏观状态保持不变，但体系内部却仍然进行着各种宏观过程，系统内部和外部的物质、能量和信息的交流过程时时刻刻都在进行，丝毫不会间断。例如，生物的生命系统的新陈代谢作用就是一个不间断地质-能转移和变换过程，各个过程的总和就是为了维持生物的生命活动，使之经常处于某一恒定状态，即非平衡定态，而不是平衡态。生物体如果趋于平衡态就意味着死亡，内外交流消失了，新陈代谢作用不能进行。这种非平衡态的有序结构是自然系统的特性，被称为“活”结构，人工系统很难达到这么高的境界。

总之，有序状态可以分为两大类，即平衡状态的有序和非平衡状态的或远离平衡状态的有序，分别相对应于热力学系统（如分子系统、机械系统等）和非热力学系统（如生命系统、生态系统、地理系统、地质系统、社会系统等），后者用 Boltzmann 有序理论来论证将遇到极大的困难，这是因为非平衡有序是不能靠降低温度而获取，也不能靠与外界环境隔绝而生存。经典的物理化学在它的面前就显得无能为力。因为传统的平衡态热力学观点，平衡态系统的各个微观组态都是等概率的，平衡态就是对应于相应条件下的最可几的宏观状态。Boltzmann 方程建立了熵与概率之间的关系，即熵随着概率的增大而增大。Prigogine 认为“第二定律具有实践上很大的重要性，却没有什么根本性的

意义”，并且不无讽刺地说：“大多数科学家认为第二定律是一种近似的结果，是主观观点对物理学精确世界的入侵。例如玻恩说过一句名言：‘不可逆性把无知引入物理学的结果’”。不可逆性的提出是针对可逆性这个传统概念，是时间在人们的脑海中有新的理解。时间与现实是紧密相联的，对于人类来说，现实是相嵌在时间流之中的。时间的不可逆性本身紧密地连接着熵，为使时间倒流，必须克服一个无限大的熵垒，显然这是不可能的。众所周知，在经典动力学中，速度反演（即从 v 变成 $-v$ ）产生的效果与时间反演（ $t \rightarrow -t$ ）所产生的一样，奇怪的是人们却视之为普适性的原则。正如 Checkland (1990) 所说的那样：“物理科学是严密的，因为它们从一开始就抛弃了自然现象的极其丰富的多样性。它们通过选择简单系统来加以考察，把整套的偏见导入任何以它们为基础的有自然界的图景中。” A. Toffler 为 Prigogine 一本书写的前言中指出：我们日常生活中对时间的认识是不一样的，“每一种文化和每个人都倾向于用一种‘时间的视野’去进行思考。” (Prigogine et al., 1987)。但是时间不仅仅贯穿到地质学、生物学和社会科学之中，而且贯穿到一直把它排斥在外的微观世界和宏观世界，不但生命有历史，社会有历史，地球和整个宇宙也有自己的演化史。承认演化就必然会同意过去、现在和未来是有差异的。“时间之矢”或“光阴似箭”的存在是系统不可逆性的基础，自然也是热力学第二定律的基础。我们关心的只是达尔文“进化论”中的自然选择或随机性引出的不可逆的进化。“不可逆性”可能是有序的源泉，相干的源泉，组织的源泉。而“平衡态热力学是物理学对自然界的复杂性问题的第一个响应。这个响应是用能量的耗散，初始条件的忘却，趋向无序的演化这样一些术语来表达的。” (Prigogine et al., 1987)。

因此，我们只想强调一下，科学的观念可以从人们的日常经验中获取，但两者之间绝对不能划等号，这里存在着一个思维上的“飞跃”。因为在人们日常认为的宏观世界里，运动物体或机械波相对于任何一个观察者的速度 (v) 总是极大地小于 c (光在真空中的速度为 $3.00 \times 10^8 \text{m/s}$)。例如，声波在空气中的速度是 332m/s ，人造地球卫星的速度是 8.1km/s ，两者的 v/c 比值分别为 2.7×10^{-5} 和 1.0×10^{-6} ，我们正是在这种 $v \ll c$ 的环境中形成了自己的时空观，习惯于在牛顿的力学体系内思考问题。自从爱因斯坦相对论于 1905 年公开发表以后，他正确地做出了速度从 $v/c=0$ 到 $v/c \rightarrow 1$ 的整个范围内的力学实验结果。人们由此看出，虽然牛顿力学体系是重要的和不可忽视的，但不过是更普遍理论中的一个特殊情况而已。同样，平衡态热力学相对于非平衡态来说，也只是一个特殊情况。在自然界，非平衡态热力学才是更具普遍意义的科学。

1.2 自组织作用 (self-organization)

世界是由物质、能量和信息三种最基本的要素组成。无生命的矿物、岩石、土壤和有生命的生物作为世界的一部分，必然也是由这三种要素组成。组成生命物质的主要成分之一是蛋白质分子，它是由 20 种不同的氨基酸组成的多肽链，包含着成千上万个氨基酸分子。如果这些氨基酸分子的各种微观排列方式是等概率的，则某种特定的氨基酸序列出现的几率将是极其微小的。例如，一种长度为 100 个或者含有 100 个氨基酸分子的蛋白质的生成过程，按一定要求的生物功能所必须的排列都将大大地低于 e^{-300} 或

10^{-130} 的概率发生。据计算,要形成这种特定的蛋白质分子,需要经历的时间极大地超过了地球的年龄,大约是 10^{124} s,而地球的年龄不过是 10^{17} s (即 46 亿年) (任光耀, 1988)。如果再考虑核酸分子的有序性,以及细胞、组织和个体的有序性,还有空间、时间和功能的有序性等等,就会意识到生物有序只能是一种高度不可几状态,平衡态热力学是无法解决的。同样,以亿万计的各种矿物分子构成岩石或矿床的有序性也是属于高度不可几状态,虽然与生物体相比这是一种较低级的运动方式。诸如,条带状硅铁建造 (BIF)、玛瑙的 Lie Segang 环带或色带结构、海底锰结核、铁矿石和石灰岩的鲕状和肾状构造、岩石表面的树枝状氧化锰矿物等结构、构造;松花蛋表面的花纹、北方冬季玻璃窗上的冰花等花样;天空云彩千变万化的形状、闪电千姿百态的运动行迹和木星上的大红斑;河水流动时形成的湍流、滴水的水龙头;激光的形成等等,真是数不胜数。美不胜收随处可见的图景,充分显示出自然系统具有极其伟大的组织能力和完美细致的表现形式。可惜人们在日常生活中的所见甚多,因而习以为常,对其本质却又知之甚少和不求甚解,不肯花气力调查研究一番,甚至主观地认为这都不过是一些琐碎的特殊现象,不具任何普遍意义,不值得花费时间和精力去追个水落石出。在生物系统和社会系统中类似的例子更是不可枚举,比比皆是,而且都是一些颇具兴趣而又难以解决的问题。如股票、物价等市场经济的暴涨暴跌,金融的正常运行和危机的出现,以及国民经济能否持续发展等等,都是引起全球人们注目的大事。这些事件的发生都是自组织作用的结果,它们不同于受控于人的机器运行和工厂生产过程,乃是物质组分(股票、商品之类)亿万个自发地组织起来并发展起来的自然现象,是一个物质系统在与外部世界相互作用的过程中,耗散了周围环境提供的能量而产生的必然结果。这就是早在 1969 年 Prigogine 就正式命名的“耗散结构 (Dissipative Structure)”。当能量的消耗促使物体运动达到一定阈值(临界值)时,例如把光源的能量注入激光器,当输入功率达到一定阈值时,受激原子同步振荡,由自然光转变为激光,即无规则的光波列由光源进入激光器后通过自组织行为转变为有规则的激光;流体力学中 Benard 不稳定现象,当流体上下温度差很小时,流体只有热传导作用,流体中温度梯度超过某一临界值时,就将出现十分规则地宏观的对流运动;化学中著名的 Belousov-Zhabotinsky 反应,证明某些有机酸(如柠檬酸)的溴酸氧化反应,在一定条件下,溶液的颜色在红色和蓝色之间,随着时间作周期性的变化,被称为“化学钟”和在均匀的溶液中由于浓度梯度造成的扩散现象等等,都是大量分子或原子以近乎一样的速度运动,即相干运动,好象某种信息传递到这些质点,使系统作为一个整体进行有组织的运动。股票炒作就是千百万人自发地“相干运动”的最好事例。自组织发生的必要条件是:

- 1) 系统必须是开放系统,与外界不断进行物质、能量和信息的交换;
- 2) 系统必须远离平衡态,其内部存在着物质和能量分布的显著差异,促使质-能的宏观转移和变换;
- 3) 系统内必须存在非线性反馈的动力学机制。

Haken 认为这些有序结构和功能都是自发形成的,是自己组织起来的,是大量子系统之间相互竞争、相互合作、联合一致、共同行动的必然结果。这些子系统的作用和行为具有明显的相似性,虽然各自都有自己的特殊规律,却能遵循和服从总的规律和要求,大家一起完成共同的任务(王贵友, 1987)。

1.3 系统演化中的随机性

Haken 认为动力学是处理必然性的运动和力, 随机理论才是处理或然性过程或随机力。只有两者的结合才能有效地描述耗散结构和系统的自组织作用, 而平衡态热力学则是决定论者。在物理学中布朗运动被认为是最简单的随机过程, 引起布朗运动的原因是由于液体分子热运动的涨落效应, 但这种涨落具有很大的偶然性。在布朗运动中可以看到液体中悬浮颗粒不停地进行着迅速而短促的跳跃, 其跳跃的路径长短不一、方向不定, 表现出明显的随机性。而物质颗粒的运动却是由于溶液分子的无规则运动所引起的。分子的不规则运动表现为每个分子的运动方向和速度都在不断地改变, 也不断地从四面八方冲击着悬浮颗粒, 由于冲击力的瞬间变化, 悬浮物也就不停顿地朝冲击力较弱的方向运动, 其路程长短因冲击力大小而异。如此反复冲击就出现布朗运动的不规则现象。如果自由运动的粒子与周围环境处于热动力平衡状态, 或粒子的各种运动状态是等概率出现, 则可以导出一个关系式:

$$C = \frac{2\gamma}{m^2} kT$$

其中: C —随机力的相关函数中出现的常数, 表示随机力的大小 (或涨落的大小); γ —系统的阻尼常数; m —粒子的质量; k —Boltzmann 常数; T —绝对温度。

可见, 常数 C 与阻尼常数 γ 相关, 随机涨落与阻尼之间有一种内在联系, 而阻尼与耗散有关, 所以说耗散的大小是决定涨落大小的基本因素。Haken 曾经颇有兴趣地以足球比赛为例, 在足球场上, 草地对足球的阻力和运动员踢球时的随机力决定了足球的运动速度。草地的阻力使足球的速度连续降低, 而运动员踢球时使球速无规律地增加, 虽然踢球的目标是对方的球门, 球却不可能径直踢向球门, 而是有直传、横传、甚至向后倒传等不同方向, 取决于当时球场的情况 (雨天、球员的跑动换位等), 拿球的队员作出传球的判断, 采取他自己认为最有利的方向传球, 这就是球的运动方向上的随机性。表现为足球踢向对方球门的必然性, 与球在场地中运动速度和方向的偶然性的结合, 也是布朗运动的一个很生动的例子。因此, 自然系统的演化过程是必然性过程与偶然性过程的统一, 其中既包含着决定性的作用, 也包含着随机性的作用。事实上, 客观世界不存在纯粹的必然性, 也不存在纯粹的偶然性, 二者是相互联系和相互制约的, 偶然性是必然性的一种表现形式, 必然性则对偶然性发展空间有着某种限制。演化过程的每一步都以大量的偶然性为基础。然而在无穷多的可能性中选择哪一种, 却是受必然性支配的。无穷的可能性的范围也是受必然性支配的, 这就是在偶然性中包含着必然性 (郭治安, 1988)。在自然科学中, 偶然性往往被归结为随机性, 必然性被归结为因果性。两者的研究方法分别是概率统计和动力学。近年来随机性的发现和混沌理论中的应用, 标志着人类在掌握随机现象规律方面的巨大进步。系统中随机力的存在必然会引出系统的随机涨落。所谓“涨落” (亦称起伏) 是表征系统中某种性质的变量, 如商品价格对其价值的偏离, 生物进化中的突变等瞬间值与平均值间某种偏离现象称为涨落。涨落是系统进化的先决条件。通过涨落, 系统由稳定点进入不稳定点, 再从不稳定点进入一个新的稳定点。在这个新的稳定点上系统将具有更加复杂的结构和更高的组织程度, 这样

一来,系统通过特定的涨落实现了进化。由于涨落的大小部分由耗散(能量)的大小所决定,系统的耗散愈大,其涨落也就愈强,当耗散达到一定限度时,系统的涨落就会使之出现较大地偏离平衡态,甚至会远离平衡态,而这正是产生自组织作用和促使进化的必要条件(Prigogine et al., 1987)。但是涨落只是提供了系统进化的机遇,进化的方向却是由环境决定的,这里就不准备多谈了。但是总的演化方向必然是有简单到复杂,由低级到高级,由无序到有序再到更高级的有序,甚至混沌。毫无疑问,这是大自然中无机界和有机界的普遍规律,人类社会的发展也可能遵守这个法则,虽然其进化速率要快得多。

1.4 成矿动力系统

自然系统的变化有其独特的规律性,不以人们的意志为转移,其时间的久远和空间的广阔远非人工系统所能比拟的。一个矿床的生成时间一般需要数万年、数十万年、数百万年甚至上千万年。与社会时间相比要长得得多,与个人的时间更是无法对比,但在地质长河中(约46亿年)只不过是瞬间产物。矿床学就是从矿床的赋存状态(产状、矿物组合、矿石的结构构造、围岩及其蚀变等),探讨成矿物质由分散无序到聚集有序的成矿演化过程。事实上,这属于动力学研究的范畴。“但是传统的早在19世纪时对动力学的那种表述,至今在许多教科书中仍然采用的表达方法”(Prigogine et al., 1987)显然是不适用的。有解的线性方程是不可能解决自然系统中那些非线性问题的,而非线性系统一般来说是不可解或无解的,也是不能叠加的。没有解也是解题的一种途径。同样,非线性系统不具任何周期行为,因而是不可预报的,如地震预报、长期的天气预报等等。实际上,对复杂性极大的自然系统的研究,已经到了“山穷水尽”的困境。近来,动力系统在各种学科领域的应用越来越多,对它的发展起了很大的推动作用。在生物学、地理学和经济学中一些现象存在的动力模型,在工程学和物理学等传统学科中也找到了动力系统的模型。计算机的应用使得理论分析与数值研究同步进行,当计算机将一系列“杂乱无章”的数字变成由成千上万个点组成的图像在荧屏上显示出来的时候,就能清晰地看出系统随时间的进展而发生的动态过程,其中每一个点都代表着系统在某一时间被冻结的一刹那的状态,点的移动所构成的图形(直线、曲线、轨道等),使人们能够直观地理解系统的演化过程。这种数学模型是生态学家几百年来苦苦追求的目标,也是矿床学家多年来梦寐以求的东西。动力系统的工作的确使得这些科学家深深地体会到“柳暗花明”的境界,因为它是采用数学中的迭代函数方法,一个迭代函数(f^*)就叫做一个离散的动力系统(Falconer, 1991)。

著名的人口学家马尔萨斯早在1788年提出,人口是按几何级数增长,而食物的供应则不会大于算术级数,这是一个线性函数,即

$$X_{\text{明年}} = rX$$

其中: X —种群数; r —种群增长率。

这是一个不受食物供给或道义约束的无限增长的模式,是不符合生物种群自然增长的规律。因为现实世界中有饥饿、有竞争,种群的发展必然受环境(非战争环境)的制约。这就需要寻找一个比较符合实际的方程,来替换这个已经陈旧的公式和思想,其中

被称为 Logistic 差分方程，即

$$f_r(X) = rX(1-X)$$

受到生态学家和数学家的高度重视，因为新的因子 $(1-X)$ 把增长速度限制在一定幅度内。当 X 上升时， $(1-X)$ 必然下降，在这里增长率 r 代表了模型的一个重要性质，表现为一个物理量。这个生态学的基本方程却因此引起了一场科学的革命，为开创“混沌”这门新学科起到了先锋作用。现在有关动力系统和混沌科学的论文不计其数，“混沌是过程的科学而不是状态的科学，是演化的科学而不是存在的科学。”（Gleick, 1990）。这个观点与矿床学的研究目标不谋而合，都是从赋存状态求其生成过程，从现实存在求其演化规律。于是将这个生态学的方程移植到矿床学领域，使我们对成矿过程中成矿元素的运动有了崭新的认识（关广岳，1993）。方程中， X 在生态学为种群密度或种群量，在矿床学中可称为成矿率或空间矿化强度，其数值限定在 $[0, 1]$ 之间，即 $0 \sim 100\%$ ； r 在生态学中为增长率，在矿床学中可称为成矿潜能，这个物理量是系统内部的阻尼（阻力、摩擦力、渗透力等）与外部环境提供的流（能量流、物质流、信息流等）的积，即

$$r = \text{潜能} = \text{阻尼} \times \text{流}。$$

当 r 值发生变化时， X 也将随着变化（关广岳，1993，1994）。如果输入物质的初始浓度为 X ，则输出值将为 $f_r(X)$ ，以此类推。图 1-1（ X - r 图解）为成矿系统的演化图像，按成矿潜能的大小可分为 I—V 共五个区：

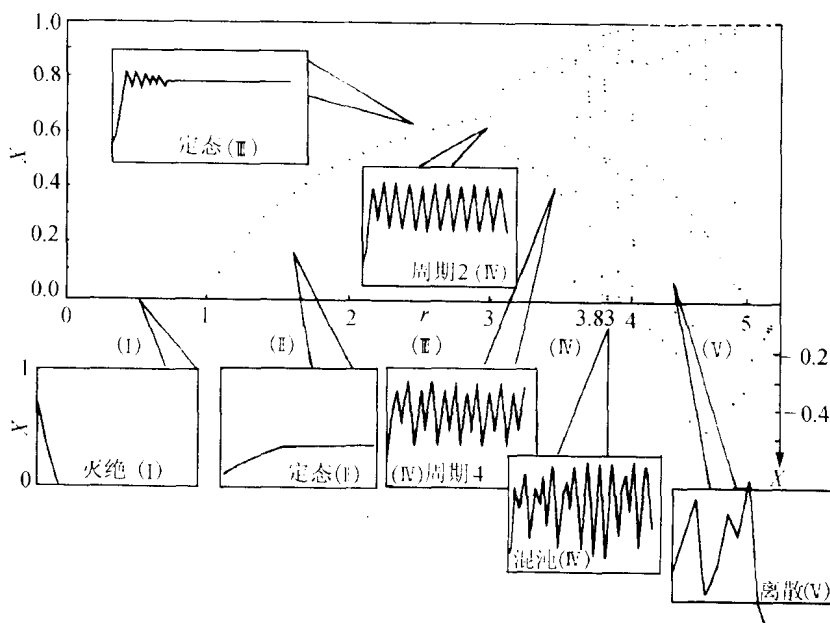


图 1-1 成矿系统随着 r 值的增大由无序—有序—混沌的演化过程和成矿作用分区（关广岳，1996）

灭绝区（I）或非成矿区：其 $r \leq 1$ ，稳定不动点 $f_r(X)$ 为 0，代表均匀无序的孤立的或封闭系统，是不可能发生成矿作用的；

直线型定态区 (Ⅱ, Ⅲ): 其中区Ⅱ ($1 < r \leq 2$), 由于潜能 r 过低, $f_r(X)$ 的稳定不动点亦低 ($X = 1 - 1/r$), 代表着含矿岩石或贫矿石的形成条件, 例如沉积的或沉积变质的铁质岩、锰质岩、铝质岩、磷质岩和条带状硅铁建造 (BIF); 区Ⅲ ($2 < r \leq 3$), 由于 r 值增大, $f_r(X)$ 的稳定不动点增高 ($X > 0.5$), 是重要的成矿阶段, 代表着层状和层控型矿的成矿条件, 如沉积、火山喷发沉积或沉积变质型铁矿床、锰矿床、铀矿床、铜和铅锌矿床等;

周期性定态区 (Ⅳ): 当 r 值超过 3 时, 由于非线性的增强, 直线型定态不复存在, 点的运移具有周期性轨道, 甚至倍周期性轨道, ($3 < r < 4$) 代表着成矿作用的最高形态, 成矿物质的品位 (或空间成矿率) 变化较大, 属于典型的热液、热液交代和风化等成矿作用, 是非常重要的成矿条件;

混沌成矿区 (Ⅳ): 当 $r \geq 3.83$ 时, 系统进入混沌状态 (Li and Yorke, 1975)。此时, 在成矿潜能不大于 4 的情况下, 点的周期性与非周期性的变化极为复杂, 可以说是瞬息万变, 目不暇接。上下震荡的幅度虽大, 却不会超过 $[0, 1]$ 的成矿范围, 只是给人们造成不稳定状态的假象, 说明成矿作用已经达到巅峰。因此, 仍可将之归属于区Ⅳ, 属于最高级阶段;

离散区或无限混沌区 (Ⅴ): 当 $r > 4$ 时, 系统不存在任何定态, 点的运动的幅度极大, 很快就会超出 $[0, 1]$ 界区, 电脑出现溢出现象, 矿物得不到聚集, 而趋向分散, 成矿作用不复存在。

以上所作的分析仅仅是初步尝试, 只不过大致勾画了总的成矿轮廓, 隐隐约约地好象存在着某种规律, 内心里感到对自己习以为常的东西, 有重新认识的必要。由于工作刚刚开始, 距离定量分析还遥远得很。

混沌作为一个科学术语首见于“周期 3 意味着混沌” (Li and Yorke, 1975) 一文, 当 $r = 3.83$ 时, 点的运动出现周期 3 的稳定轨道, 继续发展为非周期性行为称为混沌。混沌亦称浑沌, 在我国古代常指“在天地形成前的元气状态”, 淮南子论言: “洞同天地, 浑沌为朴。未造而成物, 谓之太一”。另外, 混沌亦指清浊不分的状态。我们这里所指的混沌远远不是自然过程的初始阶段, 而是过程演化的鼎盛时期, 超越这个阶段就将进入离散状态, 所谓“盛极必衰”也是自然演化的必然法则。从前面的图解中可以看出, 这是周期性 (有序) 与非周期性 (混沌) 的交替变化, 也就是定态-非定态的交替, 一直延续到 $r = 4$ 为止。J. Yorke 认为混沌无往不在, 它是稳定的和有结构的 (1975), R. May 也认为这种稳定-非稳定的交替演化是混沌行为。而形象地解释“混沌”现象的是 Ruelle 1971 年创造出的“奇怪吸引子”的概念, 奇怪吸引子是相空间中稳定的、低维的和非周期性的质点, 其运动轨迹永不相交, 否则就会出现周期性循环, 而周期性却是普通吸引子 (或吸引子) 的行为。吸引子的效应表现为可以将亿万分子以近乎同样的速度协同地完成相干运动或自组织现象 (Gleick, 1990; 刘秉正, 1994)。从集合论来讲, 一个吸引子可以设想为一个集合, 并使附近所有轨道都收敛到这个集合上 (Falconer, 1991)。奇怪吸引子则是集吸引与排斥于一身, 造成有序与无序相处共存的混沌状态。成矿系统演化的最可能的趋向就是出现奇怪吸引子, 其分数维的大小在一定程度上表现了混沌行为的复杂程度 (Gleick, 1990)。Haken 对混沌提出一个令人深思的定义, 即“混沌性来源于决定性方程的无规运动”, 表明了混沌不同于无序, 是由确定