

於崇文 编著

YU CHONGWEN

矿床在混沌边缘分形生长

FRACTAL GROWTH OF MINERAL
DEPOSITS AT THE EDGE OF CHAOS

(上卷)



四川攀枝花钒钛磁铁矿矿床
含矿镁铁质—超镁铁质岩体
的嵌套韵律层构造

地质学 地质工程

地质工程与地质技术

矿床在假定边缘分形生长

张其田 王德明 王德明 王德明

王德明

张其田 王德明 王德明 王德明



地质过程与矿产资源国家重点
实验室(北京,武汉)基础研究成果

矿床在混沌边缘分形生长

於崇文 编著

上 卷

本书出版得到

地质过程与矿产资源国家重点实验室(北京,武汉)
中国地质大学(北京,武汉)“教育部‘211工程’”

支持与资助

图书在版编目 (C I P) 数据

矿床在混沌边缘分形生长 / 於崇文编著. — 合肥: 安徽教育出版社, 2006. 11

ISBN 7 - 5336 - 4797 - 1

I. 矿... II. 於... III. ①矿床成因—研究②成矿规律—研究 IV. P61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 128179 号

责任编辑: 王宏金

装帧设计: 黄彦

技术编辑: 吴丽君

出版发行: 安徽教育出版社 (合肥市回龙桥路 1 号)

网 址: <http://www.ahep.com.cn>

经 销: 新华书店

排 版: 安徽飞腾彩色制版有限责任公司

印 刷: 安徽新华印刷股份有限公司

开 本: 850×1168 1/16

印 张: 90.75

插 页: 22

字 数: 2 400 000

版 次: 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

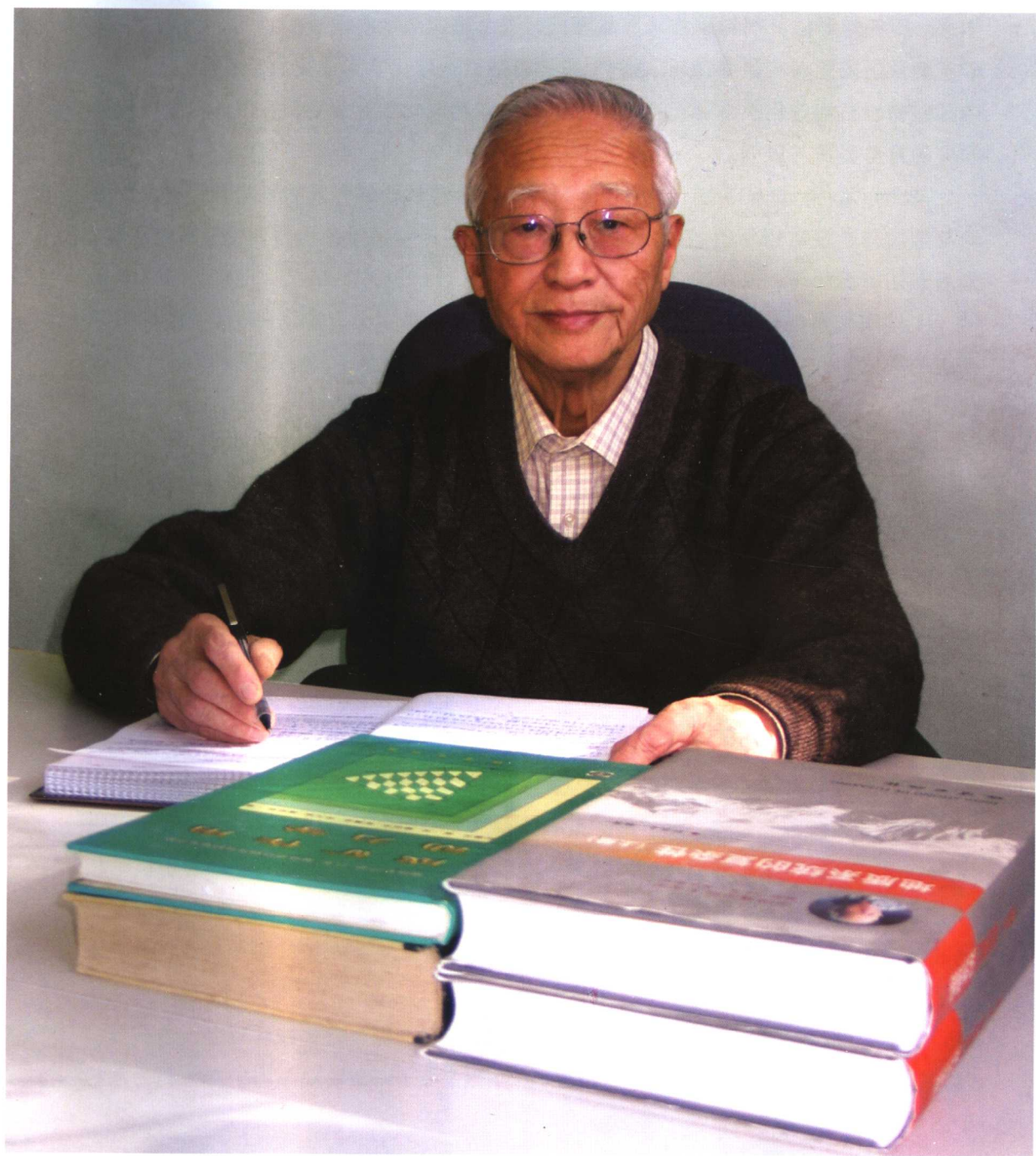
印 数: 1 000

定 价: 198.00 元 (上、下卷)

发现印装质量问题, 影响阅读, 请与我社发行部联系调换

电 话: (0551) 2822632

邮 编: 230063



■ 於崇文近影

於崇文 1924年2月15日生于上海,祖籍浙江镇海。1950年毕业于北京大学地质学系。中国科学院院士,中国地质大学教授,地球化学动力学家与矿床地球化学家。历任地质矿产部科学技术高级顾问,国土资源部地质调查局顾问,地质过程与矿产资源国家重点实验室顾问,中国地质学会勘查地球化学专业委员会名誉主任委员,中国矿物岩石地球化学学会元素地球化学与区域地球化学专业委员会主任委员以及该学会的常务委员与顾问。

毕生以地质、成矿系统为依托,致力于将基础自然科学和非线性科学及复杂性理论与地质科学及矿床学相结合,促进了地质学和矿床学由唯象科学向精确科学跨越,先后开拓出五个新的学术领域:

(1)地质科学中的多元统计分析。用多元分析研究多组分、多因素地质-地球化学系统的数值和几何学特征,并用随机过程和随机场研究地质-成矿过程和地质-地球化学场。

(2)区域地球化学。用非平衡、不可逆过程热力学研究成岩、成矿过程,并以耗散结构理论为基础,提出区域地球化学理论,进行了“南岭地区区域地球化学”研究。

(3)成矿作用动力学。将“动力学”引入矿床成因和成矿规律领域,研究成矿的发生、驱动力、动力学机制及其时-空结构与定位,在我国开创了“成矿作用动力学”的学术方向,将矿床成因机制研究提升到动力学水平。

(4)地质系统的复杂性。将“非线性科学”和“复杂性理论”引入地质系统,提出“地质作用的自组织临界过程动力学-地质系统在混沌边缘分形生长”的地质科学复杂性理论,将重大基础地质问题的研究提高到非线性科学和复杂性理论的层次,使地质科学从唯象科学向精确科学跨越。

(5)成矿系统的复杂性。从“成矿系统复杂性”的视角,应用非线性科学和复杂性理论认识矿床的内禀本质属性,系统深入地研究成矿的发生、驱动力、动力学机制和时-空结构与定位,取得了矿床成因和成矿规律的一项重要发现,即“矿产资源自发地通过自组织而归宿于自组织临界性与混沌边缘,并且分形生长”,或者简约为“矿床在混沌边缘分形生长”。

目前,他在“地质系统复杂性”与“成矿系统复杂性”研究的基础上,进一步向“区域与深部地球动力学及成矿系统复杂性”拓宽与深化,为发现新的矿产地和为危机矿山寻找后继资源提供依据而努力。

曾获国家科学技术进步奖二等奖(1988),全国优秀科技图书二等奖(1990),地质矿产部科技成果一等奖(1987)、二等奖(1985,1990,1997,2003),李四光地质科学奖的地质科研工作奖(1991),高校科技工作成绩奖(1990),国家教委和国家科委“全国高等学校科技工作先进集体”(1990)等多项奖励。

写在前面

一、编著本书的缘起与宗旨

作者半个多世纪以来,以地质、成矿系统为依托,致力于将基础自然科学、非线性科学及复杂性理论与地质科学相结合,促进了地质科学由唯象科学向精确科学发展,先后开拓出五个新的学术领域.

(一)地质科学中的多元分析

用多元分析研究多组分、多因素地质-地球化学系统的数值和几何学特征,并用随机过程、随机场研究地质-成矿过程和地质-地球化学场,出版了《数学地质的方法与应用——地质与化探工作中的多元分析》(1980).

(二)区域地球化学

用非平衡、不可逆过程热力学研究成岩、成矿过程,并以耗散结构理论为基础,提出区域地球化学理论,完成了“南岭地区区域地球化学”研究并出版了同名专著(1987).

(三)成矿作用动力学

将“动力学”引入矿床成因和成矿规律领域,自1980年起率先在我国开展“成矿作用动力学”研究,将矿床形成机制研究提升到动力学的水平,历经“六五”到“八五”三个五年计划,总结在我国南岭地区和扬子古陆周缘七个矿集区的研究成果(以於崇文等1988年、1993年和1998年的三本专著为代表),在1995年建立起一个“成矿作用动力学”研究的平台.

地质系统是一种非线性系统,其中成矿系统更是强非线性系统.在强非线性的条件下,动力学必然向复杂性深化.因此,遵循事物和人们认知的发展规律,我们从1995年起,将研究工作的重点从“成矿作用的非线性动力学”向“成矿系统的复杂性”拓宽和深化,经过“九五”和“十五”两个五年计划,同步开展地质系统与成矿系统的复杂性研究,并于2003年出版了《地质系统的复杂性》(2003).与此同时,从2004年开始构筑起“地质与成矿系统复杂性”研究的平台.

(四) 地质系统的复杂性

提出“地质作用的自组织临界过程动力学——地质系统在混沌边缘分形生长”的地质科学复杂性理论,将重大基础地质问题研究提高到非线性和复杂性科学的层次。

(五) 成矿系统的复杂性

成矿系统是地质系统的一个重要子系统,成矿系统复杂性研究是地质系统复杂性研究的继承和发展,而“矿床在混沌边缘分形生长”则是成矿系统复杂性研究的凝炼与升华。

以上是作者撰写本书的缘起。

本书从“成矿系统复杂性”的视角,运用非线性科学和复杂性理论认识矿床的内禀本质属性及成矿的发生、驱动力、动力学机制和时-空结构与定位。经过数十年的持续研究,取得了矿床成因和成矿规律的一项重要发现,即“矿产资源自发地通过自组织而归宿于自组织临界性与混沌边缘,并且分形生长”,或者简约为“矿床在混沌边缘分形生长”。作者将“复杂性科学中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌等四大前沿领域是自然界中开放、远离平衡的耗散动力学系统时-空演化的普遍规律的本质的面面观”的论断(於崇文,2003)作为“矿床在混沌边缘分形生长”这一命题的理论基础。本书以其19项基本内涵作为其客观性的判定准则,并以与其相对应的诸多非线性动力学特征为基本论点(见本书第六章的成矿理论纲要),对该命题的客观性作了系统和全面的论证,并且表明它是一种具有普适性和包容性的新的成矿理论。它将矿床学提高到非线性科学与复杂性理论的层次,并使其从唯象科学向精确科学跨越,将可取得突破性进展。

复杂性科学具有前瞻性和探索创新性。本书的观点、理论和方法以及内容体系与现有的同类著作有较大的差异,如蒙读者耐心阅读,将可分享作者在研究和著述中获得的欣喜。

二、基本内涵、自然哲学理念与复杂性理论基础

(一) 基本内涵

本书将非线性科学和复杂性理论与矿床地质-地球物理-地球化学相结合,构成全书的基本内涵。

(二) 自然哲学理念

地球物质及其运动是客观存在的,第一性的。地质作用是地球物质的运动,它既不能脱离时间,又不能超越空间。地质作用的时间演化具有一定的规律性,即“时间结构”;地质作用的空间展布也有一定的规律性,即“空间结构”。地质作用和时-空结构三位一体,相互耦合,不可分割,而地质作用(地球物质的运动)则是第一性的。

地质作用与四维时-空的紧密交织构成了地质作用与时-空结构,反映了地质事件的发生与运行机制及其时-空定位。地质作用与时-空结构是一切地质现象的本质与核心。

(三) 复杂性理论基础

作者对于复杂性科学中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌四大前沿领域作较深入的剖析后得出结论,认为以上四者是人们对自然界中开放、远离平衡的耗散动力学系统时-

空演化的普遍规律的本质的面面观. 我们可以进一步将这种普遍规律的面面观整合成以下的统一表述:

“开放、远离平衡和时-空延展的耗散动力学系统通过自组织过程而自发地向有序和混沌之间的过渡时-空域发展与演化, 经过临界慢化的瞬态过渡而归宿于自组织临界性. 自组织临界性边际稳定而又具稳健性, 是系统的全局吸引子, 它涌现在混沌边缘. 系统在混沌边缘呈弱混沌的规则和混沌并存与混合的运动, 并且经由分形生长而形成准规则的相干结构——耗散系统中的‘自孤子’. 混沌边缘具有最高度的复杂性、最完善的演化性和最巨大的创新性. 系统整体的演化遵循串级-崩塌-间断平衡相交替的分形动力学, 并且最终以自组织临界性与混沌边缘为归宿.” 或者简言之: “开放、远离平衡、时-空延展的耗散动力学系统自发地通过自组织而归宿于自组织临界性和混沌边缘, 并且分形生长.”

将以上的论断应用于成矿系统(或矿产资源), 自然可以有如下的表述:

“矿产资源自发地通过自组织而归宿于自组织临界性与混沌边缘, 并且分形生长”, 或者简约为“矿床在混沌边缘分形生长”(参见本书正文前的彩图).

三、“矿床在混沌边缘分形生长”成矿理论纲要

该成矿理论纲要(参见表 6-1)包括基本范畴及其外延、基本内涵与非线性动力学特征三部分. “基本范畴及其外延”栏内的前五项是成矿理论的基本范畴, 后七项是基本范畴的外延. “基本内涵”栏与基本范畴及其外延相对应. “非线性动力学特征”与基本内涵相对应.

四、成矿理论的客观性及其判定准则

一种理论之能够成立, 首先必须确定其客观性的判定准则, 继而加以严格的论证. 本成矿理论的 19 项基本内涵是成矿理论客观性的判定准则, 而与其相对应的诸多非线性动力学特征则是对客观性进行论证的基本论点(参见第六章表 6-1). 可以说, 全书的内容构成了对成矿理论客观性的系统而全面的论证, 足以表明: ①作者所提出的“矿床在混沌边缘分形生长”命题能够成立, 它是一种不同于前人的新的成矿理论; ②“矿产资源自发地通过自组织而归宿于自组织临界性与混沌边缘, 并且分形生长”对于矿床成因与成矿规律的探索及矿产资源的勘查具有重要意义.

五、“矿床在混沌边缘分形生长”的理论与实际意义

(1) 本成矿理论由基本范畴及其外延组成, 体现了“地质作用与时-空结构是一切地质现象的本质与核心”的自然哲学理念. 基本范畴及其外延以及 19 项基本内涵使成矿理论具有包容性.

(2) 将“复杂性科学中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌等四大前沿领域是自然界中开放、远离平衡的耗散动力学系统时-空演化的普遍规律的本质的面面观”的论断作为成矿理论的基本原理和理论基础, 从而体现了成矿理论的普适性.

(3) 成矿理论以矿床的复杂动力学的本质属性(矿床是成矿耗散系统中的自孤子)为基本出发点, 涵盖了成矿的发生、驱动力、动力学机制及其时-空结构与定位, 既阐明了“何时、何地以

及如何成矿”的宏观矿床成因与成矿规律,又从“如何”成矿进一步更深刻地揭示了“为何”成矿的微观内在本质(即成矿的发生),使人们对成矿的认知超越对成矿规律的单纯描述,而从成矿规律能动地向更高层次的成矿预测飞跃。因此本成矿理论既有深刻的理论意义,又具有重要的实际价值。

(4) 矿产资源的形成是一项庞大而复杂的系统工程。成矿理论将非线性科学和复杂性理论与矿床地质-地球物理-地球化学相结合,从成矿系统复杂性的视角,将矿床学提高到非线性科学与复杂性理论的层次,取得了矿床成因和成矿规律的一项重要发现,即“矿产资源自生地通过自组织而归宿于自组织临界性与混沌边缘,并且分形生长”。由此可见,复杂性科学能够深刻地揭示存在于复杂系统中的内在本质规律,使唯象科学向精确科学跨越,并取得突破性进展。

六、当代自然科学的发展趋势和前沿领域

现代认识论的一个重要结论认为,物质、生命、心智、大脑和人类社会都是演化的复杂系统。地球是人类居住、生活和繁衍的场所,农业、能源、矿产与水资源、生态环境、自然灾害、人口与健康以及人类与生命等都和地球的形成与演化息息相关。固体地球系统总体上是远离平衡、时-空延展的演化复杂巨系统,它具有复杂性和自组织临界性的内禀基本属性。固体地球系统的复杂性既是我国经济增长、社会进步和地学发展的重大科学问题,又是带根本性的基础理论问题。

20 世纪自然科学的发展趋势是由极小(粒子物理学)→极大(宇宙学)→极复杂(复杂性科学)。“非线性”和“复杂性”是当今世界科学的重要前沿领域之一。“非线性科学”以:(1)混沌与分形,(2)孤子和相干结构,(3)斑图及其形成与竞争等三大基本范式为其主要研究内容。而“复杂性科学”比“非线性科学”具有更广泛和深刻的内涵。

现在国际上对于复杂性科学的研究大多集中于数学理论、物理内涵及其在物理学、化学、生物学、生命科学、人脑和社会系统(特别是经济学)等方面的应用,较少研究地质系统,并且主要涉及地震、地壳断裂构造、地幔对流以及海洋与大气环流动力学等少数领域,工作比较零散。“复杂性”研究具有科学发展的时代特点,是具有前瞻性和探索创新性的基础研究,被世界科学界认为是“21 世纪的科学”。复杂性科学能够深刻地揭示存在于复杂系统中的内在的本质规律。复杂系统研究要求重组科学的现有固定分野,实现跨越不同学科的大整合,从而促进多学科交叉和融合,并且已经引起认知过程和方法论的深刻变革,推动了认知科学的重大发展。

对于地质系统的复杂性研究是 21 世纪地学发展中居于战略地位的生长点之一,可以对古老而常新的地质科学进行再认识,将基础地质和矿产资源领域的研究提高到非线性科学和复杂性理论的层次,实现地质科学从唯象科学向精确科学的跨越,取得突破性进展,并带动相关学科同步发展。

七、关于“编著”的说明

作者一生的学习与工作以“学习思考,锲而不舍;探索创新,攀登不息”自勉。通过一生的实践,本人获得了如下的体验:“复杂系统的研究要求多学科理论和方法的交叉与融合,只有通过多学科大量知识的集成与整合,才能走上创新之路。新思维往往来自凌晨初醒时突然萌发的灵感。灵感本身就产生于神经网络中由于持续思考而触发的各种已有信息之间的交互作用,因而不是唯心而完全是唯物。”

复杂系统研究是具有前瞻性和探索创新性的基础研究,复杂性是当代科学发展的一个重要前沿领域.面对这样一种新事物,人们一开始往往知之甚少.这就首先要尽可能系统和全面地学习前人通过实践所积累的一切有关知识,掌握他们处理和解决问题的各种方法,由此启迪自己的智慧,从而获得对新事物的认识.有了这个基础,再进一步通过本人的反复实践、认识与理性思考而逐渐形成自己的理论体系与方法论.鉴于以上的认识,本人采取“编著”的方式来表述本书的内容,通过这种表述也将有利于读者的阅读和理解.实际上,本书就是作者近30年来,将动力学、非线性科学和复杂性理论的学习与扬子古陆周缘和南岭地区七大矿集区(四川攀枝花钒钛磁铁矿、云南个旧锡-多金属矿、安徽铜陵铜矿、江西德兴铜金-多金属矿、江西黄沙-漂塘钨矿、湖南柿竹园钨-多金属矿、广东凡口和大宝山铅-多金属矿)的研究紧密结合、交叉融合,逐渐开拓、深化的产物.作者之所以将其中的四川攀枝花、湖南柿竹园、江西德兴和江西黄沙、漂塘等四个矿床的研究成果,作为成矿系统复杂性研究的不同范式构成本书的第四篇(第19章至22章),原因即在于此.

八、本书的结构

全书共上、下两卷,除导言外分为非线性科学基础、成矿系统复杂性理论、成矿系统复杂性专论和成矿系统复杂性范式研究(共四篇22章).第一篇“非线性科学基础”为读者提供了理解复杂性所必需的基础知识.第二篇“成矿系统复杂性理论”通过对于复杂性科学中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌四大前沿领域的实质的深入分析,论证了“矿床在混沌边缘分形生长”这一成矿理论的复杂性理论基础,并且进一步将它与矿床地质-地球物理-地球化学相结合,提出了这一成矿理论的纲要.第三篇“成矿系统复杂性专论”用复杂性理论对成矿理论的19项基本内涵作专门的论述.第四篇“成矿系统复杂性范式研究”是作者与其研究集体最近30年来对扬子古陆周缘和南岭地区七大矿集区内四个典型矿床的成矿作用动力学与成矿系统复杂性的研究成果的总结.

本书插图甚多,其中部分插图在不止一个章节中出现,为了节省篇幅,避免重复使用,文中仅保留其中的一幅,将其他地方出现的重复的图一律删去,并在该处采取“见××图”的方式提示.此外,为了便于读者理解图的原义并保持图面整齐,对图中外文不作翻译,维持原状,请读者注意.

本书的出版得到地质过程与矿产资源国家重点实验室(北京,武汉)和中国地质大学(北京,武汉)“教育部‘211工程’”的支持和资助.刘永顺博士仔细阅读了本书的全部手稿,提出了宝贵的意见,并且与博士生彭年协助作者认真整理了全书的正文、插图和各章文献.在此,作者深表谢忱.

於崇文

2006年6月

目 录

导 言	1
参考文献	9

第一篇 非线性科学基础

第 1 章 从线性到非线性,由简单到复杂	15
第 1 节 线性和非线性	15
第 2 节 线性空间	18
一、空 间	18
二、物理学与线性世界观	20
三、不可逆性、均分和孤子	25
四、误差的分布	30
五、分数维的空间	33
第 3 节 非线性科学的三大基本范式	38
一、确定性混沌和分形	39
二、孤子和相干结构	40
三、斑图:形成和竞争	40
参考文献	40
第 2 章 自相似性与分形	42
第 1 节 自相似性	42
第 2 节 分 形	46
一、Cantor 集	46
二、Koch 曲线	47
三、Hausdorff 维	48

四、Weierstrass 函数	51
五、小结	55
附 录	55
参考文献	57
第 3 章 非线性动力学	58
第 1 节 映射和动力学	58
第 2 节 离散动力学方程	60
一、连续生长方程	61
二、Logistic 方程	64
第 3 节 单峰映射	70
一、几何迭代	70
二、混沌和随机	74
第 4 节 较高维映射	75
第 5 节 概率密度	82
附 录	84
参考文献	88
第 4 章 孤子和自孤子	90
第 1 节 孤 子	90
一、基本知识	90
二、孤波的发现	94
三、孤子的相互作用	98
四、水槽中 KdV 孤子实验	101
五、守恒定律	102
六、孤子的实例和 KdV 方程的应用	104
第 2 节 自孤子	106
一、引 言	106
二、“球状闪电”	106
三、概 述	107
四、基本数学模型	113
五、Turing 不稳定性	114
六、“交叉扩散”活化系统的分层条件	116
七、活性分布介质的分类	118
八、自孤子的主要类型	121
九、自组织现象的主要类型	122
参考文献	123
第 5 章 时空结构(时-空斑图)及其形成	125
第 1 节 长程时-空关联与连通	125
第 2 节 分形时-空与标度相对性原理	128

一、自然界中标度律的普适性	129
二、时-空的根本不可微性	129
三、标度不变、自相似和分形的遍在性	130
第3节 时-空混沌结构	131
一、时-空混沌的时-空非线性动力学	131
二、复 Ginzburg-Landau 方程	150
参考文献	158

第二篇 成矿系统复杂性理论

第6章 矿床在混沌边缘分形生长	161
第1节 复杂性专论	161
一、自组织临界性	161
二、瞬态混沌	172
三、混沌边缘	179
四、弱混沌	189
五、结论	194
第2节 “矿床在混沌边缘分形生长”理论纲要	196
一、地质现象的本质与核心	196
二、地质科学的基本问题	196
三、地质科学的复杂性理论	197
四、成矿系统的复杂性理论纲要	197
参考文献	200
第7章 矿床——成矿耗散系统中的自孤子	203
第1节 分布活性系统和自孤子	203
一、自孤子	203
二、分布活性系统	204
三、岩浆孤子和岩浆矿床	205
四、热液孤子和岩浆期后矿床	209
第2节 矿床的形成机制:局部活化和长程抑制相平衡	212
一、局部自增强和长程抑制产生组织区	213
二、化学梯度在斑图形成中的关键作用	215
三、源密度反馈导致单调梯度的稳定化	216
四、场的大小及其增长部位对斑图规则性的影响	218
五、时间周期斑图向空间周期斑图的顺序转换	218
第3节 矿床的内部结构:径向对称、目标斑图的分带结构	222
一、矿床分带结构的含义	222
二、分带结构形成的弱混沌理论分析	223

三、分带结构形成的物理化学流体动力学分析	224
第4节 矿质的富集方式:矿质两种方式的源、流、汇	227
一、矿床是以某种吸引域为特征的吸引子	227
二、矿质的富集方式:矿质两种方式的源、流、汇	231
第5节 矿床的外围结构:分形性	237
一、吸引域的分形边界	238
二、吸引域分形边界附近轨道行为的不确定性	239
三、矿床外围结构的分形性	241
第6节 矿床的区域结构:局部同构性	250
一、准对称斑图的局部同构性	250
二、成矿区的区域结构:局部同构性	357
参考文献	259

第三篇 成矿系统复杂性专论

第8章 成矿物质成分的复杂性与多样性	265
第1节 核合成理论与地球物质的原始多组分性	265
一、引言	265
二、化学元素的“宇宙丰度”	266
三、核合成理论及化学元素的起源与地球物质的原始多组分性	269
四、重元素的产生(核合成理论续)	276
五、轻元素 Li、Be、B 的产生	280
第2节 化学元素的自组织与元素的“地壳丰度”	284
一、同种原子的数量增加与耦合导致化学元素的自组织和“地壳丰度”——“多组分的耦合导致自组织”	284
二、关于化学元素丰度的计算	294
第3节 量子地球化学与化学元素的共生组合	298
一、量子地球化学	298
二、量子地球化学在化学元素共生组合研究中的应用(举例)	308
参考文献	319
第9章 成矿过程复杂性——断裂-多孔岩石中复杂流动-化学反应耦合过程的动力学与复杂性	322
引言	322
一、断裂-多孔岩石是自然界中遍在的无序介质	322
二、多孔介质中输运-反应过程的两种模型	324
三、与连续体模型和离散模型相对应的两种理论及研究方法	327
第1节 渗流理论	328
一、无序介质的统计物理学	328

二、无序介质的有效输运和反应性质的计算	335
三、使孔隙体积发生改变的非催化流体-固体反应的渗流模型及多孔介质化学溶解的离散模型	346
第2节 格子气流体动力学	354
一、格子气自动机	354
二、流体动力学的两种研究思路	365
三、格子气流体动力学	375
四、多孔介质中的输运与化学反应耦合过程	387
参考文献	395
第10章 矿床的地质-地球物理-地球化学场	402
引 言	402
第1节 矿床场的局域化耗散结构	405
一、局域化耗散结构的概念	405
二、二维局域化耗散结构的理论与方法	406
第2节 矿床场量的幂律分布与矿床场的时-空分形结构	420
一、场量的时-空幂律分布	420
二、分形时-空与标度相对性原理	438
第3节 矿床场不均一性的分形性与多重分形性	449
一、矿床场不均一性的分形性	449
二、矿床场不均一性的多重分形性	466
参考文献	481
第11章 成矿系统的演化	488
第1节 成矿系统演化的原因:临界性——自组织临界性	489
一、临界性	489
二、转变和分岔	489
三、“超临界”分岔和“次临界”分岔	493
四、Hopf 分岔	499
第2节 走向时间混沌	502
一、分 岔	502
二、通过准周期运动进入时间混沌	503
三、通过倍周期分岔进入时间混沌	504
四、通过阵发进入时间混沌	505
第3节 走向时-空混沌	506
一、时间序列分析	507
二、分布自主活性系统中的湍流	511
第4节 从时间混沌到时-空混沌——成矿系统演化进程的制约	515
一、不稳定性、自由度和围限	515
二、强围限系统——临界不稳定性	517
三、热对流中的弱湍流	518

四、弱围限系统——超临界不稳定性;结构动力学;包络和相的形式体系	519
五、延展系统——次临界不稳定性	522
第5节 总 结	523
一、系统向时间混沌发展的规律	523
二、系统向时-空混沌演化的进程	524
参考文献	525
第12章 成矿的发生	529
引 言	529
第1节 局部活性原理	530
第2节 复杂性的范式(CNN)	532
第3节 反应-扩散 CNN 的局部活性判定准则	534
一、元胞平衡点	535
二、元胞复杂性矩阵	535
三、局部活性准则	536
第4节 局部活性的鉴定方法	539
一、局部活性的物理意义	539
二、奇点的类型	541
三、局部活性的鉴定方法	543
四、关于局部活性和混沌边缘的小结	546
第5节 “成矿发生”的若干重要科学问题	547
参考文献	548
第13章 超临界地质流体与成矿	550
引 言	550
第1节 超临界流体的行为和理论	551
一、临界点奇异行为和临界点理论	552
二、超临界现象与临界区域理论——“跨越理论”	564
三、近临界点的稀溶液和超临界溶解度	567
第2节 超临界地质流体的产生及其在地质体中的时-空分布——长英质岩浆房中的双扩散对流	572
一、引 言	572
二、花岗岩熔体粘滞性的模型	574
三、问题的数学表述	575
四、主要结果的总结	576
五、结果的解释	583
六、结 论	586
第3节 岩浆-热液系统中超临界流体的作用	587
一、背景和方法	587
二、岩浆-热液系统中超临界流体的作用	591