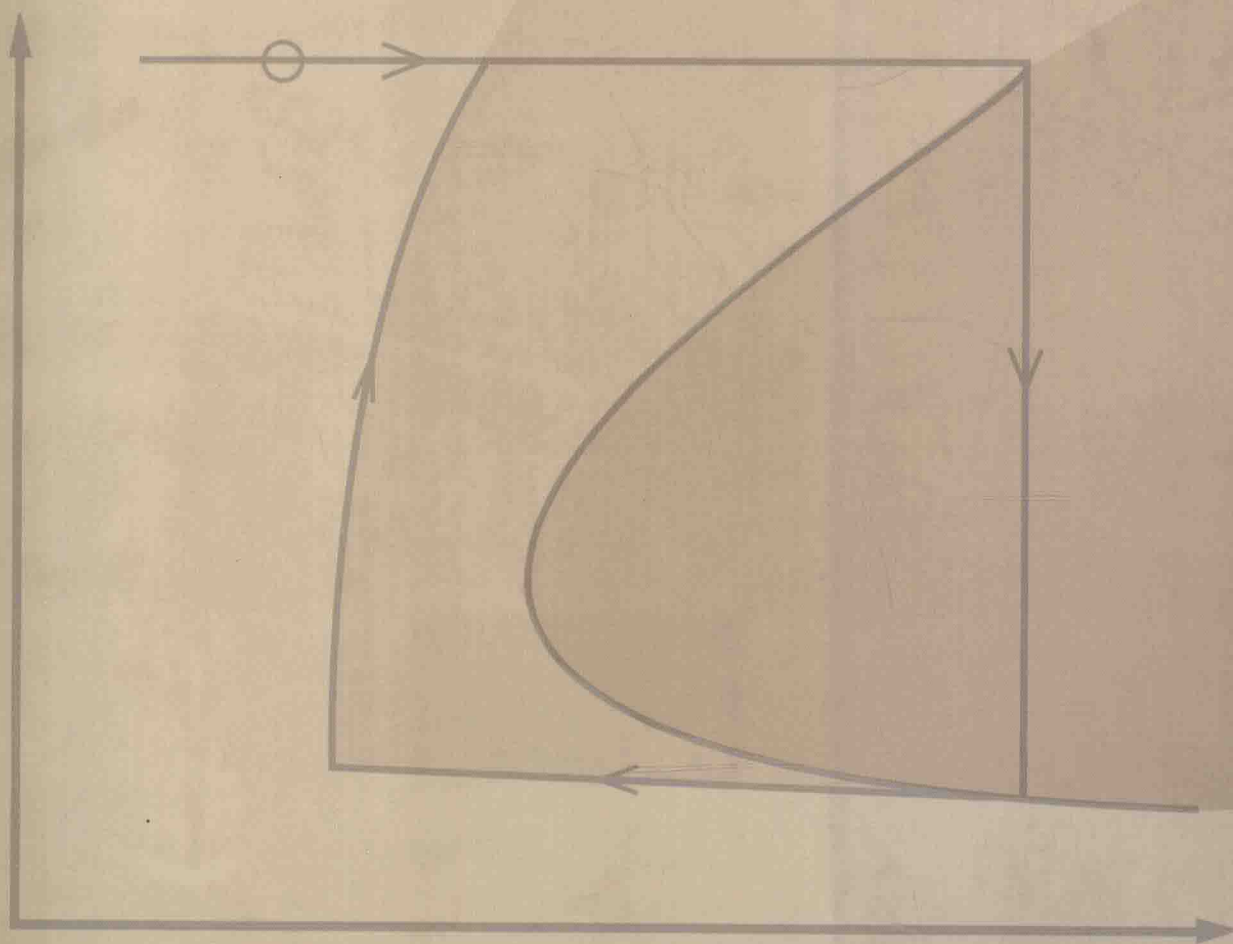


构造成矿作用非线性动力学

GOUZAOCHENGKUANGZUOYONGFEIXIANXINGDONGLIXUE

谭凯旋 谢焱石 杨建明 黄晓乃 赵志忠 著



地质出版社

构造成矿作用非线性动力学

谭凯旋 谢焱石 杨建明 著
黄晓乃 赵志忠

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书将构造、流体与成矿作为一个统一的体系,从构造变形、应力、流体流动与质量迁移、地球化学反应及成岩成矿作用等多种地质过程的耦合与反馈出发,建立了构造成矿的反应-输运-力学耦合的综合动力学模型和1~3维模拟计算方法。以湖南沃溪金锑钨矿床、水口山铅锌金多金属矿田、柿竹园钨锡铋钼多金属矿床等典型矿床为实例,系统研究了成矿的构造背景和构造成矿、控矿特征,构造作用与含矿流体形成、演化、运移及沉淀成矿的关系;分析了断裂构造、断裂带元素分布的多重分形特征和矿体厚度、品位空间变化的混沌特征及其动力学机理;通过计算机模拟研究了构造作用、流体运移与成岩成矿反应的相互耦合关系和构造成矿的非线性动力学过程与机制。

本书对从事地质过程动力学、成矿动力学、矿床地球化学、构造地质学等专业和环地质学、水文地质学、非线性科学理论与应用等相关专业的研究人员均有重要参考价值,也可供相关专业的高年级学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

构造成矿作用非线性动力学/谭凯旋等著. -北京:地质出版社,2003.6
ISBN 7-116-03835-3

I. 构… II. 谭… III. 地质构造-成矿作用-非线性力学:动力学 IV. P541

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 033436 号

责任编辑:江晓庆

责任校对:黄苏晔

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324573(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:292 千字

印 数:1—800 册

版 次:2003 年 6 月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00 元

ISBN 7-116-03835-3/P·2377

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前言

近 20 年来,人们发现自然界和社会生活中广泛存在远离平衡态的非线性现象和非线性过程,非线性科学已成为当代科学技术的发展前沿之一。地质作用、地球化学作用和成矿作用也大都都是复杂的非线性动力学过程,受到多种因素的非线性耦合作用,并具有开放体系和远离平衡态两个显著特征(於崇文,1998、1999、2000;Ortoleva,1994)。因此非线性科学从诞生起就与地球科学有着密切的关系,一些非线性理论还是起源于对地学现象的研究,如分形理论最初开始于对海岸线的研究。近 10 多年来,地球科学中的非线性现象与动力学机制的研究越来越受到重视,地质体系的非线性动力学还作为几次国际会议的主题并出版了论文集,涉及地质、地球化学、地球物理、矿床、石油、地震等广大领域。

成矿系统是地球物质系统的组成部分,成矿作用既是地质作用的特殊产物,又是一种重要的地质过程。因此,矿床是一个复杂的地质系统,成矿作用是一个复杂的动力学过程(於崇文,1994、1998、1999、2000)。矿床的形成受到多个过程(如成矿元素的活化、迁移与含矿流体的形成,流体运移与汇聚、沉淀成矿等)的制约,而且每一个过程又可能受到多种因素的影响。在众多的因素中,构造和流体起了最重要的作用(陈国达,1978;翟裕生,1996、1997)。构造活动与构造应力是流体运移的重要驱动力之一(Ge, et al., 1992;孙雄等,1998),而构造变形特别是断裂作用可以显著增高岩石的渗透率(Holness, 1997;Sibson, 1996;Curewitz, et al., 1997),并提供流体运移的通道和成矿的场所(McCaffrey, et al., 1999;Sibson, et al., 1988、1994、1996;Tsang Chin-Fu, 1998、1999)。流体作为从矿源地汲取并搬运成矿物质的主要媒介,在促使成矿物质从分散到富集成矿的过程中起了重要的作用(翟裕生,1996;贾跃明,1996)。因此,必须开展构造成矿作用或构造-流体-成矿作用的动力学研究,并将构造-流体-成矿系统及其动力学作为一个统一的整体,从它们的耦合作用来研究成矿系统的形成过程和动力学机制(翟裕生,1996;邓军等,1999、2000;谭凯旋等,1999、2001;Valentine, et al., 2002)。

构造成矿作用或构造-流体-成矿作用是各种转变过程(如矿物相变、化学反应)、各种输运过程(如流体流动、质量迁移、能量输运、动量传递等)和力学过程(如应力、应变和构造变形)的耦合,也就是反应-输运-力学(reaction-transport-mechanism,简称 RTM)的耦合与反馈作用。如流体-岩石反应影响成矿流体的形成和金属矿物沉淀,构造(压溶作用)和热影响反应的进行,岩石的矿物、化学组成直接影响流体-岩石的反应;构造变形(如断裂、压实作用)影响岩石的渗透率、流体流动汇聚与成矿,变形受岩石结构与力学性质和应力的控制,同时也受流体(压力)和流体-岩石反应(填充断裂空间和断裂愈合)的影响。流体-岩石反应可影响岩石的矿物组成、结构和力学性质,进而又影响到构造变形,断裂中流体活动产生矿物沉淀可堵塞流动通道和导致断裂的愈合,并进一步影响成矿的寿命和矿床规模的大小。因此,构造成矿作用和构造-流体-成矿体系与很多其他地质体系一样,是非平衡的和非线性的动力学过程,必须从多过程、多因素的非线性耦合作用来研究构造成矿作用的动力学过程和动力学机制(邓军等,2000;谭凯旋等,2001)。

本书以湖南水口山铅锌金多金属矿田、湘西沃溪金锑钨矿床、柿竹园钨锡铋钼多金属矿床等3个典型矿床为实例,运用分形、混沌等非线性理论并结合地质地球化学分析和计算机模拟,系统研究了构造成矿的非线性特征,构造作用-流体运移-成岩成矿化学反应等多过程间的相互作用和非线性耦合关系;建立了构造成矿作用的反应-输运-力学耦合的非线性动力学模型和数值模拟方法,通过理论分析和计算机模拟研究构造成矿的非线性动力学过程和动力学机理。

本书的研究工作主要得到中国科学院资源与生态环境研究“九五”重点项目“构造成矿作用的非线性动力学研究”(项目编号:KZ952-s1-402)的资助,其中动力学模型和水口山矿区的研究还分别得到国家自然科学基金项目“滇西兰坪盆地流体演化与成矿作用的动力学研究(项目编号:49702024)”和“地球化学和成矿体系中的非线性耦合与自组织(项目编号:70171057)”的资助。研究过程中得到陈国达院士、欧阳自远院士、刘顺生研究员、范蔚茗研究员、林舸研究员等的指导和帮助。部分动力学模拟计算工作是在美国印第安纳大学地球动力学计算实验室(Laboratory for Computational Geodynamics, Indiana University)完成的,在模型设计和模拟计算中得到该实验室 P. Ortoleva 教授以及 A. Park 博士、K. Tuncay 博士的帮助。野外工作中得到了有关矿山和地质队的许多同志的帮助。本书的出版得到南华大学的支持和资助。在此谨对以上单位和专家一并表示衷心的感谢!

全书共分6章,前言、第一章、第二章、第六章由谭凯旋执笔,第五章由谢焱石执笔,第三章由谢焱石、赵志忠、黄晓乃执笔,第四章由杨建明、谭凯旋执笔,最后由谭凯旋统一审核定稿。由于作者水平有限,难免存在不妥甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 概 论	(1)
第一节 地质和构造成矿系统的复杂性与非线性	(1)
第二节 分形理论在构造成矿研究中的应用	(5)
第二章 构造成矿作用的非线性动力学模型和模拟方法	(13)
第一节 动力学模型	(13)
第二节 数值模拟方法	(26)
第三节 数据输入和输出	(32)
第三章 矿床地质与构造成矿特征	(38)
第一节 湘西沃溪金锑钨矿床地质与构造成矿特征	(38)
第二节 水口山铅锌金多金属矿田地质与构造成矿特征	(55)
第三节 柿竹园钨锡多金属矿床地质与构造成矿特征	(69)
第四章 构造与成矿流体的形成和演化	(87)
第一节 湘西沃溪金锑钨矿床成矿流体特征	(87)
第二节 水口山铅锌金多金属矿田成矿流体特征	(92)
第三节 柿竹园钨锡多金属矿床成矿流体特征	(99)
第四节 构造影响成矿流体形成演化的动力学机理	(102)
第五章 构造成矿的分形动力学	(110)
第一节 断裂构造的分形与多重分形特征	(110)
第二节 湘西沃溪金锑钨矿床裂隙-脉系统的分形及混沌特征	(117)
第三节 湘西沃溪金锑钨矿床金品位的分形及混沌特征	(133)
第四节 石英脉厚度与金品位空间变化分形结构的成矿指示	(144)
第五节 水口山铅锌金多金属矿田断裂带中元素的分形特征	(147)
第六节 构造成矿作用的分形与混沌动力学	(156)
第六章 构造成矿作用的动力学模拟	(160)
第一节 湘西沃溪金锑钨矿床构造成矿动力学	(160)
第二节 水口山铅锌金多金属矿田构造成矿动力学	(168)
第三节 柿竹园钨锡多金属矿床构造成矿动力学	(174)
第四节 构造聚流成矿作用	(177)
参考文献	(178)

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Introduction	(1)
§ 1 Complexity and nonlinearity of geology and tectonic metallogenic system	(1)
§ 2 Application of fractal theory in research of tectonic metallogenesis	(5)
Chapter 2 Nonlinear dynamic model and simulating method for tectonic metallogenesis	(13)
§ 1 Dynamic model	(13)
§ 2 Numerical simulating method	(26)
§ 3 Input and output of data	(32)
Chapter 3 Characteristics of geology and tectonic metallogenesis of ore deposits	(38)
§ 1 Characteristics of geology and tectonic metallogenesis of Woxi Au-Sb-W deposit	(38)
§ 2 Characteristics of geology and tectonic metallogenesis of Shuikoushan Pb-Zn-Au polymetallic ore field	(55)
§ 3 Characteristics of geology and tectonic metallogenesis of Shizhuyuan W-Sb polymetallic deposit	(69)
Chapter 4 Affection of tectonics on formation and evolution of ore-forming fluids	(87)
§ 1 Characteristics of ore-forming fluids in Woxi Au-Sb-W deposit	(87)
§ 2 Characteristics of ore-forming in Shuikoushan Pb-Zn-Au polymetallic ore field	(92)
§ 3 Characteristics of ore-forming fluid in Shizhuyuan W-Sb polymetallic deposit	(99)
§ 4 Dynamic mechanism of the affection of tectonics on the formation and evolution of ore-forming fluids	(102)
Chapter 5 Fractal dynamics of tectonic metallogenesis	(110)
§ 1 Fractal and multifractal analyses of faults	(110)
§ 2 Fractal and chaotic feature of fracture-vein system in Woxi Au-Sb-W deposit	(117)
§ 3 Fractal and chaotic feature of Au grade in Woxi Au-Sb-W deposit	(133)
§ 4 Metallogenic significance of fractal structure for thickness and Au grade of quartz veins	(144)
§ 5 Fractal feature of element distribution in fault zone of Shuikoushan Pb-Zn-Au polymetallic ore field	(147)
§ 6 Fractal and chaotic dynamics of tectonic metallogenesis	(156)
Chapter 6 Dynamic simulation of tectonic metallogenesis	(160)
§ 1 Dynamics of tectonic metallogenesis of Woxi Au-Sb-W deposit	(160)

§ 2 Dynamics of tectonic metallogenesis of Shuikoushan Pb-Zn-Au polymetallic ore field	(168)
§ 3 Dynamics of tectonic metallogenesis of Shizhuyuan W-Sn polymetallic deposit	(174)
§ 4 Flow-focusing metallogenesis by tectonics	(177)
References	(178)

第一章 概 论

第一节 地质和构造成矿系统的复杂性与非线性

一、地质系统的复杂性

现代科学的发展将一个新的接力棒交给了非线性科学,非线性科学是研究自然科学的各个不同领域内的非线性系统所具有的超越不同学科领域局限性的共性及其研究方法的新学科。非线性科学的发展使人们对自然的认识正经历着从简单性向复杂性的根本转变(Nicolis, et al., 1977)。这种复杂性的内容是广泛的,包括系统组成的复杂性,系统演化随时间变化的复杂性,以及随着空间位置而变化、形成非常复杂图案的空间变化复杂性等。

地球科学在非线性科学的形成和发展过程中起了重要作用(赵鹏大等, 1992),地质作用、地球化学作用和成矿作用大都是复杂的非线性动力学过程,受到多种因素的非线性耦合作用,并具有开放体系和远离平衡态两个显著特征。地质系统的复杂性主要表现在以下几个方面。①地球系统组成的复杂性和层次性。地球系统由地核、地幔、土壤-岩石圈、大气圈、水圈及生物圈等多圈层构成,各圈层又由大量的子系统或单元组成,并形成许多层次,如岩石圈由岩浆岩、变质岩和沉积岩3大类岩石组成,岩石又由各种矿物组成,而矿物又由化学元素组成,等等;②地质系统的非均匀奇异性。由于地质系统组成的多层次性,就必然存在大大小小的尺度,从而造成空间不均匀的奇异性,如矿床规模大小悬殊,空间分布极不均匀,特别是一些超大型矿床主要分布在少数几个国家和地区,它们一般是处于开放的、远离平衡的系统之中;③各子系统和各组元之间非线性相互作用过程的不可逆性。最明显的就是流体-岩石(水-岩)相互作用和各圈层之间的相互作用;④系统对初值变化具有很强的敏感性。即小的原因可能引起大的后果,甚至可能引起系统行为的质变;⑤空间中形成图案的稳定性。通常在某些局部发展形成各种各样的自组织形态,使其对某些微扰的敏感性减弱,在空间中形成较为稳定的图案。

二、地质过程动力学体系

反映一个系统的复杂性的重要标志之一是系统的层次结构。根据系统的组织形式、时间尺度、功能和相互作用的层次结构,可以划分出具有不同复杂性的地质系统及揭示各系统复杂性的动力学作用方式和动力学研究内容(图1-1)。

三、非线性地质动力学

随着非线性科学的发展及其在地球化学中的引入和应用,一门新的地球科学分支学科——非线性地质动力学正在逐步诞生。地质作用是各种转变过程(如矿物相变、化学反应等)和各种输运过程(如流体渗流、扩散、质量迁移、能量输运、动量传递等)的耦合。根据地质过程中的主要动力学机制、动力学体系的特征及目前的研究现状,从图1-1中的

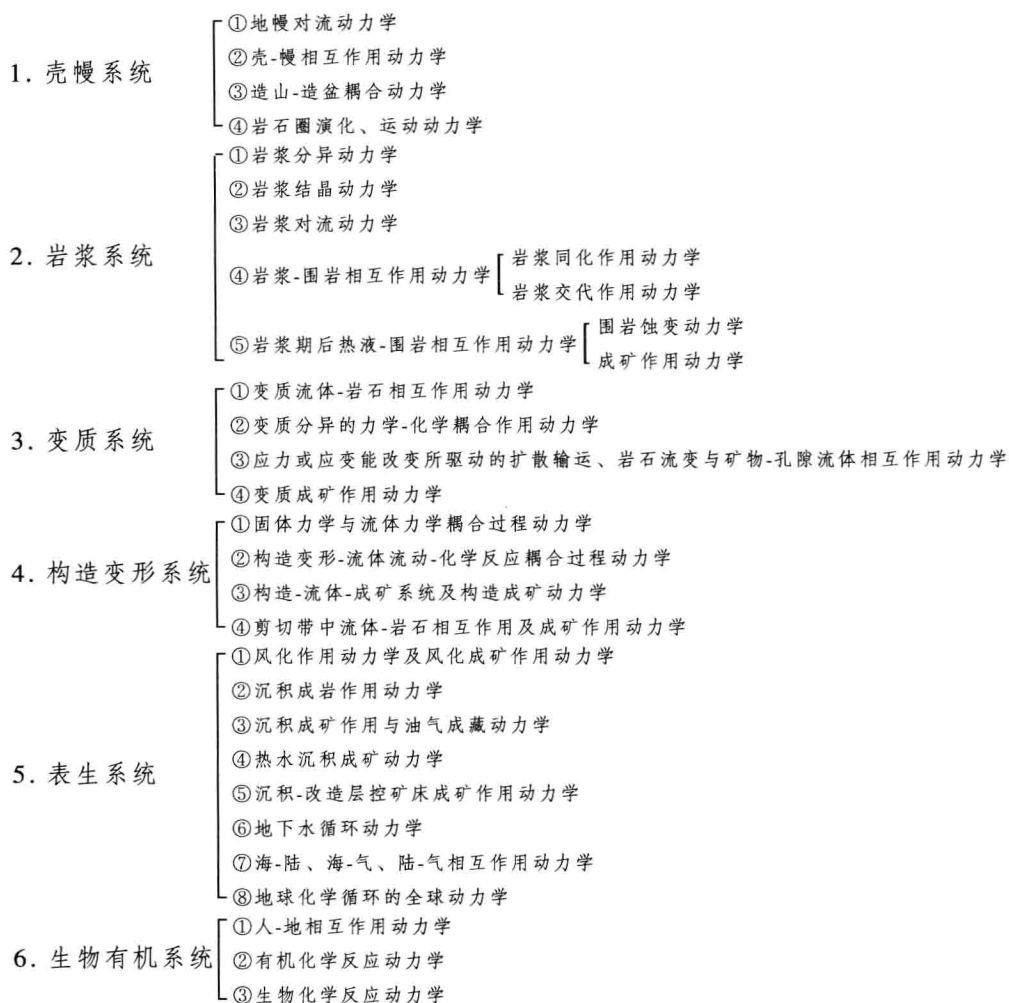


图 1-1 地质过程的动力学体系

地质动力学体系可概括出非线性地质动力学的主要研究内容如下。

1. 地质过程的非线性反应动力学

化学反应是一种最重要的地质和地球化学作用，例如水-岩反应影响到岩石的风化、成岩作用、变质作用、成矿元素的活化迁移与矿床的形成、环境变化和水质等。化学动力学研究地质过程中化学反应的速率，各种内外条件对速率的影响及化学反应的历程（或机制），又可分为：

矿物溶解、风化动力学

矿物结晶、生长动力学

矿物表面吸附动力学

同位素分馏和交换动力学

有机反应和成油成烃动力学

由于上述地质过程中的化学反应主要是多相（非均相）反应体系，因而大多数反应具有非线性特征，如反应中组分的振荡变化、矿物和岩石中的环带构造、条带构造、结构单元层的混层等，目前主要开展了矿物-水非线性反应动力学和矿物沉淀、结晶和生长的非线性动力学的研究。

2. 非线性地质流体动力学

地质流体动力学主要是研究流体在地质体中的宏观运动速率与机制。根据介质和流体的性质又可分为：

孔隙介质流体动力学

断裂（裂隙）介质中流体动力学

均质（单相）流体动力学

非均质（多相）流体动力学

由于地质介质和地质流体通常是不均匀的（为了研究的方便，目前主要作均质来处理），地质中的流体动力学具有非线性特征（Sahimi, 1993），如双扩散对流等。

3. 流体-岩石相互作用非线性动力学或流体流动-反应耦合的非线性动力学

研究流体流动与流体-岩石反应之间耦合过程的动力学（此处流体包括岩浆、变质流体、热液流体和地下水等）简称流动-反应耦合非线性动力学。流动-反应的耦合作用可以形成岩石和矿床中的许多非线性现象，如矿床的分带、围岩蚀变分带、岩石中的指状反应前锋、聚流作用和岩溶作用等。当流体流过孔隙岩石时，岩石中的一些易溶矿物便发生溶解，使岩石的孔隙度（渗透率）增大，因而流入的流体量也增大，这又进一步促进矿物的溶解并更增大孔隙度，这样在流体流动与化学反应的耦合中产生正反馈作用，并将导致反应前锋的形态不稳定性和聚流作用的发生。

4. 力学-流动-化学耦合非线性动力学

研究构造变形、流体运动、化学反应相互耦合作用的动力学，常简称为力学-化学耦合非线性动力学（Dewers, et al., 1990; Ortoleva, 1994）。岩石、矿床和构造中许多重要的复杂现象，如变质层理（变质分异层状构造）、缝合线构造、矿物晶体中的位错构造、板劈理、破劈理、折劈理、压力影构造、轴面面理、石英杆状构造、盆地中流体分隔仓、流体异常压力的形成与流体阶段性释放等，均被认为可能是由力学-化学耦合作用形成的非线性复杂现象。

5. 壳-幔相互作用动力学

研究地壳和地幔（特别是岩石圈和软流圈）相互作用的热、质传输、力学和化学过程之间的控制、响应、反馈和耦合及其与壳幔不均一性、大陆增生、造山作用、拆沉作用、岩浆作用和成矿作用的动力学关系，这已成为全球动力学和大陆动力学研究的前缘。

6. 造山-造盆耦合动力学

造山带和盆地是大陆地壳最明显相对的两个构造单元，山脉和盆地的相间排列构成大陆地貌的最基本特征。把盆地和山脉作为一个动力学系统来考虑，研究山脉、盆地的相互作用和造山-造盆的耦合动力学，揭示大陆动力学体制。

7. 非线性成矿动力学

研究成矿流体形成、运移与沉淀成矿的动力学过程与动力学机制，构造-流体-成矿耦

合动力学, 生物-流体-成矿系统及耦合动力学。它实际上包含在前四个方面的研究之中, 鉴于成矿系统的特殊性和矿产资源的重要性, 有必要单独开展非线性成矿动力学的研究。

8. 地球化学全球循环的非线性动力学

从全球的尺度研究元素的地球化学分布与循环, 如碳、硫、氧、氮、磷等元素在大气圈、生物圈、地壳、湖泊、海洋、河流和沉积物中的分布及其循环的速率、机制和模式, 称之为地球化学循环动力学或全球动力学。对地球化学全球循环的动力学研究 (Lasaga, 1980) 表明, 各种元素循环之间的非线性耦合和各个库之间的非线性耦合能够深刻影响地球化学循环动态行为的反馈过程的发生和循环过程的稳定性, 强调在地球化学循环中开展非线性动力学研究的重要性, 并称之为非线性全球动力学。

四、构造成矿作用的复杂性与非线性动力学

成矿系统是地球物质系统的一个组成部分, 成矿作用既是地质作用的特殊产物, 又是一种重要的地质过程。因此, 矿床是一个复杂的地质系统, 成矿作用是一个复杂的动力学过程。矿床的形成受到多个过程 (如成矿元素活化、迁移与含矿流体的形成, 流体运移与汇聚、沉淀成矿等) 的制约, 而且每一个过程又可能受到多种因素的影响, 其中构造是最重要的控制因素。构造活动与构造应力是流体运移的重要驱动力之一 (Ge, et al., 1992; 孙雄等, 1998); 而构造变形, 特别是断裂作用, 可以显著增高岩石的渗透率 (Holness, 1997; Sibson, 1996; Curewitz, et al., 1997), 并提供流体运移的通道和成矿场所 (McCaffrey, et al., 1999; Sibson, et al., 1994、1996; Tsang Chin-Fu, 1998、1999)。因此, 必须开展构造成矿作用或构造-流体-成矿作用的动力学研究, 即将构造-流体-成矿系统及其动力学作为一个统一的整体, 从它们的耦合作用来研究成矿系统的形成过程和动力学机制。

构造成矿作用受构造-流体-岩石-化学的耦合作用的控制, 如流体-岩石反应影响成矿流体的形成和金属矿物沉淀反应, 构造 (压溶作用) 和热影响反应的进行, 岩石的矿物、化学组成直接影响流体-岩石的反应; 构造变形 (如断裂、压实作用) 影响岩石的渗透率、流体流动汇聚与成矿, 变形受岩石结构与力学性质和应力的控制, 同时也受流体 (压力) 和流体-岩石反应 (填充断裂空间和断裂愈合) 的影响。因此构造-流体-岩石的耦合作用通过影响岩石渗透率、流体流动和化学反应而控制成矿作用的发生和矿床规模的大小。只要当断裂通过有利的地层岩石才能显著增高渗透率, 并长时间保持以使巨量流体较长时间汇聚形成大型矿床。

构造成矿动力系统是一个时空复杂系统, 目前已认识到了成矿作用普遍具有多期、多阶段性的重要特征, 并提出了“多因复成矿床”、“沉积-改造矿床”、“叠生矿床”等概念, 这种成矿作用的多期、多阶段性正是成矿动力系统在时间演化上复杂性的表明; 而矿床在空间上分布的不均匀性、自相似性和多重分形分布特征, 特别是一些大型、超大型矿床的形成和分布以及矿床的分带性等, 都是成矿动力系统在空间演化上复杂性的表现, 它们构成了成矿作用的时空耗散结构。根据时空混沌理论和耗散结构理论, “成矿作用的发生”实质上就是成矿的非平衡定态失稳并转变为新的有序 (耗散结构), 成矿动力系统在时间上对初始条件的敏感依赖性和在空间上对边界条件的敏感依赖性无疑会影响到成矿作用的局域化, 因而在相似的地质构造环境中, 有的地区产出了大型、超大型矿床, 而有的地区却没有或仅有小型矿床。

构造成矿动力系统由流体及各种组分、岩石及岩石中各种矿物等众多单元组成,所以它是一个具有极高自由度的系统。每一个单元都在一定条件下表现出非线性,从外部流入成矿系统的能量不断改变各单元的状态,状态量在达到单元所能承受的值后,即发生逆转,表现出非线性特点。同时,每个单元又都以某种方式和系统中的其他单元发生相互作用(如流体中组分与围岩发生反应)。其结果是以随机方式流入系统的能量,在系统中以单元非线性和单元之间相互作用的自组织方式被吸收和耗散。最后系统进入自组织临界状态。在临界状态下,由于自组织的作用,小事件可以引发大事件而发生成矿作用。临界状态的一个结果是“弱混沌”的存在,因而矿床存在预测的可能性。在“弱混沌”系统中,分形结构的存在成为临界状态的时间和空间上的识别标志。

根据上述构造成矿动力系统的时空复杂性、对初始条件和边界条件的敏感依赖性、自相似的分形结构和自组织临界性等特征,成矿动力学的研究内容和方法可归纳为以下4个方面:①分析成矿系统中各类地质数据的分形结构特征及其地质意义,这样既可查明成矿系统的复杂程度,又可以在一定程度上反映其成因特征,为建立反映成矿动力学本质特征的数学模型提供依据;②建立综合的多过程耦合的非线性成矿动力学模型,对模型进行稳定性分析和数值模拟,分析初始条件、边界条件等对成矿动力学的影响,分析成矿的自组织临界性,分析成矿作用的动力学条件与动力学机制;③通过分形结构分析了解成矿规律,建立矿产预测的分形模型;④在上述研究基础上进一步分析研究区的成矿条件、成矿远景与找矿方向。

第二节 分形理论在构造成矿研究中的应用

分形几何学(fractal geometry)是非线性科学的重要内容之一,它是由法裔数学家曼德布罗特于20世纪80年代初创立的一门新的几何学(Mandelbrot, 1982),它为研究自然界的不规则形状和复杂过程提供了新的定量方法。分形的基本特征就是自相似性或标度不变性,它可以用分数维这一特征量来定量描述。自相似性或标度不变性也是地学中的一个普遍现象(Korvin, 1992; Turcotte, 1992),因而分形理论在地质科学中具有广阔的应用前景。

前面已指出,矿床是一个复杂的地质系统,构造成矿作用是一个复杂的非线性动力学过程,这种构造成矿作用的复杂性必然会导致矿床的分布在空间上是极不均匀的,并在一个矿床中也将导致矿体空间展布和品位变化的复杂性,而描述这种时空复杂性的有效方法就是分形方法。利用分形方法,可以研究构造成矿过程的非平衡性和矿床分布及其制约因素的复杂性和不规则性。矿床的空间分布的研究历来受到矿床地质研究者的重视,一方面有助于矿床成因机制的研究,另一方面有助于揭示区域成矿规律并指导找矿勘探。近年来的研究发现,矿床的空间分布也具有分形分布特征,并随尺度范围的变化而具有两个分形关系(李长江等, 1996; 施俊法等, 1998; Carlson, 1991; Blenkinsop, 1994)。

断裂是构造变形和地壳演化的重要产物之一,也是一种重要的构造作用方式,它对热液迁移和矿床的形成、油气运移和油气藏形成、地下水迁移和废物的地下储存、地壳运动和地震灾害的研究等方面都具有重要意义。因此,断裂构造的研究历来受到广大地质工作者的高度重视,特别是在矿床的研究中,很多学者都是通过对断裂构造的分形研究来探讨

构造成矿、控矿机理和矿床分布规律的。

一、分形研究的理论基础与方法

目前,人们对分形的理解通常指具有自相似性或结构对称性的几何对象与各种动力学过程,而将定量描述上述自相似性的参数称为“分数维”或简称“分维”。分形和分维具有几个基本性质:①自相似性。指事物的局部(部分)与整体在形态、信息和功能等方面具有统计意义上的相似性;②标度不变性。指适当放大或缩小分形对象的几何尺寸,整体结构并不改变;③无标度区特性。指自然现象的分形特征只有在一定的尺度范围内和在一定的层次中才能表现出来,这个具有自相似性的范围称之“无标度区”;④相对于欧氏几何学中只存在整数维,分维几何中的维数可以是整数,亦可以是分数;⑤自然界中的分形常常是具有自相似分布特征的随机现象,因此必须采用概率统计的方法进行分析与处理。

1. 容量维 D_0 (Capacity Dimension)

容量维又可称作盒维数 (Box-counting dimension), 实际上是 Hausdorff 维数 D_0 的一种具体实现, 其定义是以覆盖为基础的。其具体分析方法是, 以边长为 r 的正方形格子构成二维正交网格去覆盖研究区域, 在不断改变长度 r 的取值下, 分别计算出研究对象所分布的网格数 $N(r)$ 。若 $N(r)$ 与 r 满足如下幂定律关系:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (1.1)$$

C 为常数, 则研究对象为分形, D 为分维值。显然, 若在双对数坐标中 $N(r)$ - r 图为一- 直线, 则该直线的斜率为 $-D$, 也即为容量维 D_0 , 这就是通常所称的数盒子法。

2. 信息维 D_1 (Information Dimension)

如果不像容量维定义中仅仅考虑覆盖所需求的个数 $N(r)$, 而是考虑分形集的元素在覆盖中出现的概率, 便可得到信息维 D_1 。假定将分形体用边长为 r 的正方形分割为 $N(r)$ 份, 若分形集的元素出现在第 i 个单元的概率为 P_i , 则根据信息论, 这时的总信息量为

$$I(r) = - \sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r) \ln P_i(r) \quad (1.2)$$

式中: $\sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r) = 1$ 。若变化 r , 则有 $I(r) = I_0 - D_1 \ln r$, 从而信息维为:

$$D_1 = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I(r)}{\ln r} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r) \ln P_i(r)}{\ln r} \quad (1.3)$$

可见, 容量维恰好是等概率情况下 $[P_i \approx 1/N(r)]$ 信息维 D_1 的特例, $D_1 \leq D_0$ 。在实际计算中, 变换盒子边长 r 值, 如果 $I(r)$ 与 $\ln r$ 之间存在线性关系:

$$I(r) = -D_1 \ln r + I_0 \quad (1.4)$$

则可由直线的斜率求出信息维数 D_1 。

3. 多重分形分析

由单分形集合构成的非均匀分布分形集合称为多重分形。分形和多重分形的区别主要在于分形的标度指数和分维值为常数，且二者相等；而多重分形的标度指数和分维值是连续变化的。Evertsz 和 Mandelbrot (1992) 认为，分形主要应用于物体的集合，而多重分形应用于测量之中。对于具有几何支撑的连续随机空间分布变量，这种支撑可以由通过 k 维空间 R^k ($k=1, 2, 3$) 分割产生的许多单元组成。假设 $\mu(S)$ 表示集合 S 在 R^k 中的测度，将研究区划分为边长为 r 的正方形单元格子，边长为 r 的第 i 个单元中的信息量为 $\mu_i(r)$ ，则分配函数 $x_q(r)$ 定义为：

$$x_q(r) = \sum_{i=1}^{N(r)} \mu_i^q(r) \quad (1.5)$$

式中： $N(r)$ 是边长为 r 的单元总数； q 为任意实数， $-\infty \leq q \leq \infty$ 。如果测度 $\mu_i(r)$ 服从多重分形模式，对于任何 $x_q(r)$ 方程 (1) 分配函数与单元大小 r 具有简单的幂定律关系：

$$x_q(r) \propto r^{\tau(q)} \quad (1.6)$$

式中： $\tau(q)$ 为 q 阶矩的幂指数（标度指数）。如果满足多重分形假设，在 $x_q(r)$ 对 r 的双对数图中构成一系列的直线，每一个 q 值对应一条直线，每一条直线的斜率给出一个 $\tau(q)$ 值。对于单分形也可以获得一组直线，但是对任何 q 值，所有的 $\tau(q)$ 值为一常数，或者 $\tau(q) = -\tau(-q+2)$ 。

多重分形的多重分维值 D_q 可由 q 阶矩的幂指数 $\tau(q)$ 求出：

$$\tau(q) = D_q(q-1) \quad (1.7)$$

如果 r 较小，表述测量本身自相似性的关系式：

$$\mu(r) = r^\alpha \quad (1.8)$$

可用来定义奇异指数 α 。具有相同 α 值的所有小区域组成一个分维为 $f(\alpha)$ 的分形子集，对于具有相似性的多重分形， α 为 q 的函数 $\alpha = \alpha(q)$ ，由 (1.2) 和 (1.4) 式可得出：

$$\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (1.9)$$

在单分形中, 对所有的 q 值, 其 $\alpha(q)$ 都相同; 而在多重分形中, 分维谱函数 $f(\alpha) = f\{\alpha(q)\}$ 具有如下形式:

$$f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (1.10)$$

分维谱 $f(\alpha)$ 曲线上的每一个点都代表了具近似相同的奇异指数 α 的 S 子集的分维值。 $q = 0$ 时, $f(\alpha)$ 达到最大值 $f_{\max}\{\alpha(0)\} = -\tau(0)$, 对应于盒维数 D_0 ; 在二维集合中, $f_{\max}\{\alpha(0)\} \leq 2$, $q = 1$ 时的 $f\{\alpha(1)\}$ 就是信息维 D_1 。

显然, 对于多重分形来说, 标度指数 $\tau(q)$ 和多重分维 D_q 都是从整体上来描述多重分形的特征, 而只有奇异指数 α 和分维谱函数 $f(\alpha)$ 才能表述多重分形的局部特征。

二、断裂构造的分形结构与空间分布的复杂性

断裂体系空间分布分维值的大小是断层数量、规模、组合方式及动力学机制的综合体现, 是一项综合性指标, 它可以作为断层构造复杂程度的一个定量参数 (Scholz, et al., 1985)。影响断裂构造分维值的因素有介质的物化性质、构造应力场及区域构造活动强度等。一般说来, 发育于构造活动强烈的较浅部的脆性、张扭性断裂带, 断裂长度较大, 小断层及分支断层繁多, 带内破碎程度高, 断层构造也复杂, 从而具有较大的分维值; 反之, 发育于构造活动较弱地区深部的韧性、剪切断裂带, 断层较为稀少, 小断层及分支断层也相应较少, 其分布的分维值也较小。

对中国大陆深断裂系空间分布规律的研究表明 (连长云等, 1995), 断裂构造分布的复杂性因其发育的程度和规模而增大。中国大陆的深断裂系在深度或规模上可分为 3 个层次: 即超岩石圈断裂、岩石圈断裂和壳断裂; 从形成时代上则可分为 3 个时段: 即前古生代、古生代和中新生代。从规模与形成时代上对它们分别进行分形研究表明, 断裂系由深而浅或由老到新, 分维值依次升高。根据分维值变化的这种规律性可以看出, 浅部的壳型断裂以脆性小型断裂为主, 且分布较为密集, 断裂构造分布形式较为复杂, 故分维值较大; 深部发育的韧性超岩石圈断裂, 分布稀疏, 因而分维值较小。从时间演化上的规律来看, 从前古生代到中生代, 晚期断裂叠加在早期断裂之上, 增加了断裂的不规则程度和占领空间的能力, 使得断裂构造复杂程度增加, 分维值也因而增大。

日本岛弧断层系的空间分布也表现出分形分布特征与分维值的区域性变化 (Hirata, 1989), 整个日本岛弧断层系的分维值为 1.05 ~ 1.60, 北伊豆半岛的分维值为 1.49, 山口地区的分维值为 0.72, 岛弧中部地区的分维值为 1.5 ~ 1.6, 并随离开中心距离的增加而减小。

不仅大范围的区域断层体系具有不同的分维值, 小范围的应力差异也可产生具有不同分维值的断裂构造分布。对平顶山高庄矿煤中断裂分布的分形特征研究表明 (陈江峰等, 1999), 不同的区块具有不同的分维值, 其范围介于 1.180 ~ 1.869 之间。将区内各块段的分维值作分维等值线图与煤中断裂分布图对比发现, 在矿区中部断裂分布相对简单稀少的区域恰好与分维值 $D \leq 1.58$ 所圈闭的区域相对应。在矿区南端, 断裂分布密度大, 条数多, 展布形式复杂, 这一特性在相应的分维等值线图中与分维值 $D \geq 1.62$ 所圈闭的区域相对应。可见, 分维等值线图可以定量刻画小范围的煤层中断裂分布的复杂程度, 断裂构

造分布的复杂性与高分维值之间具有良好的一致性。

断裂构造的分形结构特征还与断裂的发育演化有关,随着应变的增大和断裂的演化,分维值也不断变化,当变形达到饱和时,断裂的分维值也将达到一个常数(Cowie, et al., 1995),从而分维值可作为断裂构造发育的成熟度和复杂程度的测量。Cello (1997)在对意大利 Apennines 构造带中部第四系断层进行分形研究时发现,在断裂构造完全发育和连通之前,它们本质上是三维空间中的二维特征(盒维数为 1 左右),随着断裂的发育和连通,分维值也增大(>1),断层间的连通在断裂力学中起了重要作用。根据自组织临界理论,断层的演化过程就是通过小断裂的连接并自组织到一点,使应变集中到具分形几何的主要断裂上,最终形成具分形分布特征的断层体系。

三、断裂分形结构与流体成矿作用

断裂在增高岩石渗透率、引导流体流动、汇聚和控制矿床的形成过程中起着重要的作用,因此断裂构造的分形结构特征与矿床的关系是人们研究的重要方向之一。近来的研究表明,断裂构造体系的分维值可指示矿床定位及成矿流体运移的条件。断裂组成越复杂,规模越大,断裂分布的分维值就越高,断裂构造的活动性也就越强,从而愈有利于成矿元素的活化、成矿流体的运移聚集与大型超大型矿床的形成。

湘中锑矿带是世界上最著名的锑矿产区,断裂构造对锑矿床的空间分布起着明显的控制作用。对湘中各锑矿带断裂体系的盒维数和信息维数计算表明(卢新卫等, 1999),不同的锑矿带断裂体系具有不同的分维值,断裂体系分维值大的地区,锑矿床数量较多,规模较大,分布也较均匀;反之,断裂体系分维值小的地区,锑矿床较少,分布也不均匀。锡矿山-龙山矿带断裂体系的盒维数和信息维皆大于 1.80,且较其他矿带大,该矿带内与锑矿成矿作用有关的 NNE 向断裂极为发育。相应地,该矿带锑矿床数量及规模也较其他矿带大,湘中 80% 的锑矿储量集中在该矿带。著名的锡矿山超大型锑矿床和龙山大型金锑矿床就产于该矿带。江西德兴斑岩铜矿区内(金章东等, 1998)铜厂矿区($D = 1.813$)断裂分维值高于富家坞矿区($D = 1.801$),其矿床规模也是铜厂矿区大。因此,断裂的分维值越大,越有利于流体成矿作用,特别是只有当某一地区断裂体系的分维值大于其临界值(1.8 左右)时,才有可能形成大型、超大型矿床。

对断裂岩石块体进行二轴压缩试验的数值模拟表明(Zhang, et al., 1994),岩石的断裂变形随分维值的增大而显著增大。地质体的连通性与断裂分布的分维值有关,并存在一个断裂分维临界值,低于该临界值则连通性差,当断裂分布分维值达到或高于该临界值时,则断裂的连通性好,发育连续的断裂族贯穿整个地质体。对不同岩性及不同大小分布与断裂方向的模拟得出这个断裂分维临界值为 1.22 ~ 1.38。因此,分维值大的区域,常是应力集中(释放)、断裂发育和连通性好的地段,从而为成矿流体的运移、聚集提供了有利的运移通道和汇聚场所。成矿流体沿着断裂带上升,在浅部的构造有利部位聚集成矿。并且,这种具分形结构的断裂和热液体系,也导致了矿床的分形分布(Carlson, 1991; 谭凯旋等, 2000)。

四、矿床的分形和多重分形分布

国内外众多的研究表明,矿床的空间分布具有分形或多重分形结构特征。如 Carlson (1991)对美国盆岭省热液矿床分布的分形分析得出,美国西部盆岭省 4775 个热液贵金属