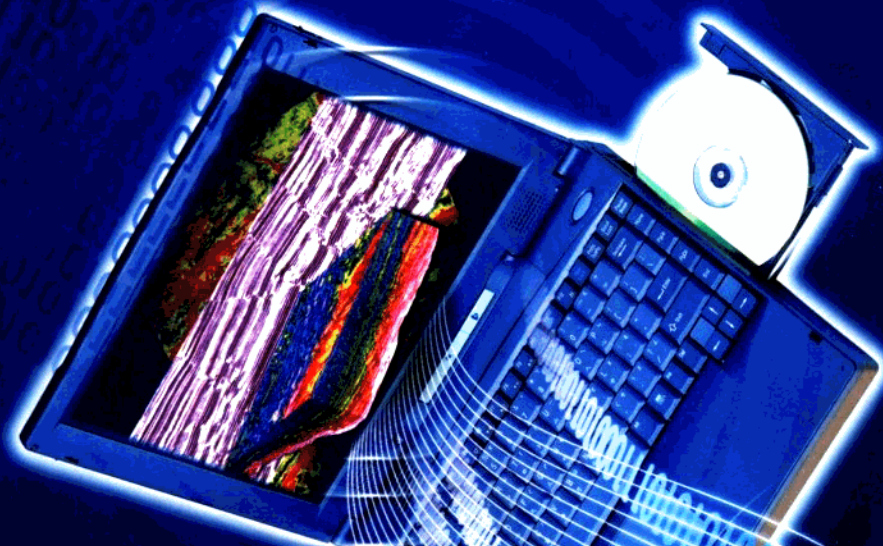


大尺度盆地 计算机定量分析方法

Computerized Analysis
Methods of Large
Scale Basins

薛林福 潘保芝 王东坡 李舟波 编著



4-39
0

石油工业出版社

序

沉积盆地是油气生成和赋存的场所，因此盆地分析一直是石油地质学家首先关注的问题。大尺度盆地计算机定量分析是沉积盆地分析领域中的一个重要前沿研究课题，是推动沉积盆地分析向量化研究不断深入的有效途径。大量的油气勘探实践表明，只有从沉积盆地的尺度或更大尺度对沉积盆地进行定量研究，才能真正认识沉积盆地特征和油气分布之间的关系。沉积盆地构造演化、沉积过程和深部地球动力过程很难用物理、化学实验再现，但是计算机技术、科学可视化、科学计算的高速发展，为开展沉积盆地的定量分析奠定了坚实的基础。通过沉积盆地地质综合研究，建立沉积盆地的地质模型和数学模型，利用计算机技术可以再现沉积盆地的构造—沉积演化的动态过程，这为检验模型、修正模型、认识沉积盆地的形成演化和预测油气资源的分布具有重要意义。随着含油气盆地勘探开发的不断深入和资料的不断积累，需要有一些高效的技术和方法，来快速提取反映沉积盆地形成演化的参数，并以这些信息作为约束条件，使大尺度沉积盆地模拟能够建立在更加可靠的基础之上。薛林福教授等在上述诸方面开展了大量有益的探索性研究，同时，该项研究也是沉积盆地分析领域中的一项创新。

根据近十年来开展的“大尺度盆地计算机定量分析系统”的理论研究和软件开发取得的成果和认识，以及参考该领域的一些重要研究成果。薛林福教授等较全面系统地讨论了沉积盆地系统的岩石圈热结构、伸展盆地和挤压盆地的构造和盆地动力学模拟的理论和方法，伸展盆地充填过程模拟方法、沉积过程模拟方法，以及作为沉积盆地构造分析基础的井间构造计算机自动分析方法。讨论了这些方法的计算机实现流程，提出了沉积盆地动力学系统、沉积盆地的分形和非线性动力学特征、层形态的概念，在盆地动力学模拟基础上深入探讨了沉积盆地构造与深部构造的关系，介绍了大尺度盆地计算机分析系统的体系结构、主要功能和用户界面，并以下辽河外围伸展型盆地为例进行了卓有成效的研究。

本书是在薛林福教授等长期研究和实践基础上完成的。其内容丰富，论述深入，是第一本关于大尺度盆地分析计算机定量研究的论著，是沉积盆地分析向量化研究方面的重要突破。该书的出版发行必将对沉积盆地分析这一研究领域的科学发展起到重要的指导和推动作用，这是一件值得庆贺的事。

中国工程院院士 李庆远

2003年10月

前 言

大尺度盆地分析是盆地分析领域中的一个具有挑战性的研究方向,其主要研究目标是把盆地作为一个整体探索盆地构造、沉积、深部地质和盆地地球动力学等基本特征及其相互关系。大尺度盆地计算机定量分析是通过建立盆地定量模型,充分利用现代计算机的强大计算和图形图像显示能力模拟和再现沉积盆地的形成演化过程、定量分析盆地的基本地质特征及其与油气资源形成与分布之间的关系。

1992年以来,由于对计算机在盆地分析中的应用的兴趣,作者在参阅了大量盆地定量分析研究资料的基础上,并结合所承担的科研课题,不断跟踪该领域的研究进展,对计算机在盆地分析中的应用和盆地的定量研究方法及技术进行了探索性研究。早期研究主要集中在对大陆伸展盆地构造—沉积充填和伸展盆地形成的热动力过程等方面。以后逐步扩展到挤压盆地构造、盆地地球动力学等方面。这些研究归纳起来主要包括两个方面:其一是有关盆地构造—沉积—动力学过程的模拟;其二是盆地特征的定量分析,即从钻井、地震和测井等地质、地球物理资料中提取盆地的特征参数,为大尺度盆地模拟提供控制参数或作为验证大尺度盆地模拟结果的依据。在开展研究的过程中,陆续用 VC++ 开发了一些分析和模拟模块,2001—2002年,在中国石油天然气集团公司石油勘探开发研究院的资助下,通过进一步研究,完善了已有模块并开发了新的模块,集成之后形成了具有统一用户界面的“大尺度盆地计算机分析系统”。该系统运行于 Windows 平台上,可以对伸展和挤压盆地的构造、地球动力学过程进行正向模拟分析,还可以对盆地的岩石圈热结构、盆地的沉积过程、沉积相的空间分布等进行分析和预测。

大尺度盆地计算机定量分析是加深对盆地认识的一种重要方法,是开展盆地形成演化研究的数字实验手段。国内外已有的有关大尺度盆地的研究成果为提高盆地的研究和认识水平奠定了基础,成为推动盆地研究的重要动力之一。本书的编写主要基于作者在近十年来所开展的工作,以及“大尺度盆地计算机分析系统”开发所完成的工作。由于作者的研究领域所限,本书所讨论的大尺度盆地计算机分析主要以伸展盆地为主,实例资料较多,但对挤压盆地的研究主要侧重于理论描述,对与剪切有关的大尺度盆地计算机分析方法没有涉及。

本书共分 11 章。概论给出了大尺度盆地计算机分析的基本概念、主要研究内容,介绍了计算机地质建模和模拟及定量地质分析等大尺度盆地计算机基本分析方法,总结了大尺度盆地计算机分析的研究现状和发展趋势。

第二章主要讨论了盆地动力系统的概念和伸展盆地动力系统的形成演化过程,介绍了伸展盆地动力系统的基本地质特征,并从非线性动力学和分形几何学的角度,总结了盆地动力系统的基本特征。

第三章论述了岩石圈热结构和古热流分析方法、盆地古热流与热沉降之间的关系,并对辽西盆地和松辽盆地南部的岩石圈热结构进行了实际分析。

第四章讨论了井间断裂构造分析方法,介绍了如何利用动态波形匹配原理进行地层对比,并生成地层对比路径图,详细讨论了井间断裂不同情况下的路径图模式。

第五章和第六章描述了伸展盆地的构造、充填及地球动力学过程的模型和模拟方法,提

出了层形态的概念。第五章给出了大陆伸展盆地的基本模型,讨论了构造作用与沉积充填的关系,总结了重建盆地演化的构造沉积学标志。第六章讨论了伸展盆地地球动力学过程的模拟方法,描述了在盆地形成演化过程中岩石圈温度场的变化、深部地质过程、深部过程与盆地形成演化之间的关系,讨论了岩石圈流变强度的概念和 YSE 的估算方法,给出了莫霍面与岩石圈/软流圈界面起伏的关系。

第七章和第八章分别介绍了卷入基底的前陆盆地构造分析方法和断层转折褶皱的模拟方法,描述了多种模式的基底卷入构造的正向模拟过程及单断裂和多断裂转折褶皱构造过程模拟的实现过程。讨论了挤压盆地形成演化过程中岩石圈热扰动、岩石圈挠曲、盆地几何形态以及相互关系。

第九章介绍了碎屑沉积过程模拟的数学模型和模拟实例。建立在流体动力学方程基础上的沉积过程模拟,可以再现河流、冲积扇、浊积扇、三角洲等典型沉积环境的沉积过程。通过沉积过程模拟,初步实现了根据古地理条件参数进行沉积相的空间分布预测,这可应用于古沉积环境分析和现代沉积环境分析。

第十章介绍了大尺度盆地计算机分析系统(Large Scale Basin Computerized Analysis System, LSBCAS)的体系结构、系统功能、用户界面等,提供了 LSBCAS 的主要 C++ 实现类的描述。

第十一章总结了辽河盆地外围地区的基本构造特征,讨论了盆地构造格局、构造样式和区域构造演化序列和演化模式,讨论了构造—充填模拟和盆地地球动力学分析在该区的应用。

本书的编写完成与许多同事、学生的参与和帮助是分不开的,他们在本书有关内容的研究和编写方面做了大量的工作,许敏博士编写了第二章,周小军编写了第四章并参与了第七章的编写,王钦军参与了第七章的编写,王剑参与了书稿内容的准备和图件的绘制。许多同行也给予了很多帮助和支持,石广仁教授非常关心“大尺度盆地计算机分析”研究,对研究工作给出了许多具体指导,米石云、郭秋麟和张春生就本书的有关内容提出了许多宝贵意见和建议。邸雪峰等编辑为本书的编辑和出版付出了巨大的努力。在此对上述提及的以及未提及的对本书编写提供帮助和支持的所有人表示深深的谢意。

本书所涉及的研究工作是在原中国石油天然气总公司辽河油田和石油勘探开发科学研究院等单位和国家自然科学基金“九五”重大项目(49894190)的资助下完成的,在此表示感谢。

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 盆地动力系统及其特征	(6)
第一节 盆地动力系统	(6)
第二节 伸展盆地动力系统的基本地质特征	(8)
第三节 盆地系统的非线性特征	(9)
第三章 岩石圈热结构和古热流分析	(16)
第一节 岩石圈热结构分析	(16)
第二节 盆地古热流与盆地热沉降关系分析	(19)
第四章 井间断裂构造自动分析方法	(21)
第一节 井间地层对比与断裂构造分析的计算机方法	(21)
第二节 路径图分析	(28)
第五章 大陆伸展盆地的构造—充填过程模拟	(38)
第一节 基本构造模型	(38)
第二节 构造作用与沉积充填	(41)
第三节 重建盆地演化历史的构造沉积学标志	(48)
第六章 大陆伸展盆地地球动力学过程模拟	(54)
第一节 地质模型和数学模型	(54)
第二节 伸展岩石圈的流变强度	(57)
第三节 莫霍面和岩石圈/软流圈界面的起伏	(62)
第七章 挤压盆地构造分析	(64)
第一节 卷入基底的前陆盆地构造分析	(64)
第二节 断层转折褶皱的计算机模拟	(74)
第八章 挤压盆地地球动力学过程分析	(81)
第一节 挤压作用与地壳缩短模型	(81)
第二节 挤压盆地动力学模拟的实现	(86)
第九章 沉积—搬运过程模拟	(88)
第一节 流体运动的数学模型及其简化	(88)
第二节 单一沉积类型的搬运沉积模拟	(95)
第三节 多种沉积类型的沉积搬运模拟	(102)
第四节 沉积搬运的模拟模块及其应用实例	(106)
第十章 大尺度盆地计算机分析系统	(113)
第一节 系统的体系结构	(113)
第二节 系统功能	(117)
第三节 用户界面	(117)
第十一章 辽河外围盆地综合定量分析	(120)

第一节	区域地质背景及构造演化·····	(120)
第二节	松南—辽西沉降带的构造和充填模拟·····	(130)
第三节	深部构造特征及盆地演化的地球动力学过程·····	(135)
第四节	地球动力学特征分析·····	(139)

第一章 绪 论

一、引言

随着人类社会对资源需求的不断增长和勘探难度的日益增大,我们需要用新理论、新技术和新方法去完善和发展已有的地质理论,更有效地发现、开发和利用油气资源。大尺度盆地计算机定量分析是解决这一难题的重要途径之一。盆地计算机定量分析使盆地研究从传统的定性描述向定量化和自动化方向发展,尤其是最近的十几年中,为了提高勘探效率,减少投资风险,石油工业对沉积盆地的定量研究的兴趣迅速增长,目前它已成为盆地分析中最活跃的研究领域之一。随着勘探开发程度的不断提高,油气资源勘探难度的不断增加,人们逐渐了解到从盆地整体认识盆地演化对油气资源勘探开发所具有的重要意义。长期盆地勘探开发过程中所积累的资料为利用计算机技术从定量的角度对盆地进行分析创造了有利条件。

地质科学研究的目标是如何发现和推测在已知地质事实和现象所构成的时空框架中的未知区域,从而达到对地质演化历史的认识。盆地分析和石油地质研究的基本问题是在已知资料的控制下预测盆地内地层和岩石在三维空间中的分布。对盆地认识的深入程度取决于对这一目标的实现程度。盆地计算机定量分析是推动盆地深入研究的动力,是使盆地研究走向定量化和自动化的重要途径。盆地的定量研究迫使人们对所能获得的资料、数据进行更深入的分析,找出各种数据之间的定量关系。

盆地在其发展历程中,一方面不断掩盖其发展历史,另一方面也留下了许多有关盆地演化历史的痕迹,这为我们研究其发展历史提供了重要信息。现代探测手段和探测技术也为我们提供了更多了解盆地的资料,但是仍然留下了许多需要推测的空间,已有理论为利用各种技术去充填这些空间奠定了基础,地震勘探为控制地层的基本形态和构造样式提供了大量的资料,但是没有提供足够的细节信息,钻探资料提供了井中的详细地质资料,但缺乏对区域性特征的控制,计算机技术的高速发展提供了把多种信息有效地结合起来的工具。

二、基本概念

大尺度盆地计算机分析是利用计算机技术,将盆地看作一个系统,通过定量研究盆地构造作用、沉积过程和地球动力学演化过程,从已获得的大量地质和地球物理资料中提取有关盆地特征、演化和指示石油形成与分布的地质信息的盆地分析方法,它是建立在广泛、深入的盆地构造、沉积和深部地质研究基础上的。其研究目标是定量重建盆地构造演化史、沉积史、盆地演化的地球动力学过程和预测油气资源的分布规律。

大尺度盆地计算机分析系统是建立在大尺度盆地定量分析的理论和方法的基础上,利用计算机技术构建的盆地尺度上构造、沉积和盆地地球动力学分析的软件系统,它是认识盆地形成演化与油气聚集规律关系的一种重要工具。

大尺度盆地计算机分析的核心是把盆地作为一个系统进行研究。长期的盆地研究和油气资源勘探开发实践表明,要深入认识盆地的形成演化和油气资源的分布,必须把盆地作为一个统一的系统进行研究。由于能源开发的需要,越来越要求人们更加深入地认识盆地的形成

及演化过程。

计算机技术的迅速发展为盆地计算机定量分析提供了强大的计算动力。不断进步的地球探测技术为深入了解盆地的深部地质过程及盆地形成和演化提供了重要信息。

几个重要概念构成了大尺度盆地分析的基础,如岩石圈有效弹性厚度、盆地构造模型和地球动力学模型、岩石圈的热结构、屈服强度包络线(YSE)的概念等。

大尺度盆地计算机分析可以使人们能够定量地认识盆地演化过程中有关盆地几何形态、构造作用、地球动力学演化的动态过程。计算机分析是盆地分析理论创新的重要途径,对盆地的认识是使能源资源勘探走向精确化的重要途径。

三、主要研究内容

大尺度盆地计算机定量分析是多学科综合的研究领域,主要研究内容为:

(1) 盆地地质特征分析方法。根据地质、地球物理资料,利用统计学、人工智能、计算机图像分析技术,提取有关盆地形成、演化的构造、沉积和地球动力学信息。

(2) 岩石圈壳—幔温度结构分析方法。根据岩石圈的结构、组成和热参数,推断岩石圈的热结构。

(3) 盆地构造建模和模拟。在深入研究盆地构造、特征、样式和演化的基础上,建立描述不同类型盆地构造形态及演化的构造模型,并模拟盆地构造随时间的演化过程。

(4) 盆地地球动力学建模和模拟。建立盆地几何形态、构造样式、深部地质过程和温度场结构之间的定量关系,模拟盆地随时间演化的地球动力学过程。

(5) 沉积过程模拟研究。探讨了建立有效地描述冲积扇、三角洲、河流相等形成和发展过程的地质和数学模型的理论和方法。

(6) 沉积盆地充填样式与地层构型研究。综合盆地构造和沉积充填模拟,模拟盆地的充填过程,研究在不同沉积和构造条件下,盆地的充填样式和地层构型。

(7) 大尺度盆地计算机信息系统研究。大尺度盆地计算机分析需要以大量基础数据为基础,研究如何有效地存储大尺度盆地分析所需的基础地质、地球物理信息和参数,这对于开展复杂的大尺度盆地计算机分析尤为重要。

(8) 大尺度盆地可视化研究。随着盆地数据分析和模拟理论和技术的不断进步,通过大尺度盆地计算机分析将获得越来越详细的盆地构造、沉积和盆地地球动力学信息,利用可视化技术可以充分展示各种分析和模拟结果。

四、研究方法

1. 计算机地质建模与模拟

沉积盆地模型是对盆地的地质概念抽象和数学描述。建模是在综合地质、地球物理、地球化学等多门学科以及对盆地形成、演化过程认识的基础上,充分利用大地构造理论、沉积学、地层学、古地理、古气候、水动力学等学科的知识,确定控制构造作用、沉积过程和盆地地球动力学演化的各种因素及其相互关系的过程。建模是模拟的基础。

盆地模拟根据地质模型和数学模型,利用计算机技术,模拟盆地形成演化历史、油气资源的形成、运移和聚集过程的一种综合性定量研究方法,大尺度盆地计算机模拟主要是模拟盆地形成和演化历史及其盆地地球动力学过程。通过盆地模拟可以预测和再现盆地整体特征、结构和盆地随时间的动态演化及油气的形成和聚集过程。盆地模拟技术以动态性和预测

性为特色,在油气资源的勘探开发中具有重要作用。

2. 定量地质分析

定量地质分析是以钻井、测井和地震勘探等资料为基础,利用数值方法或神经网络、遗传算法等人工智能方法,提取有关盆地构造、沉积、深部地质、热结构等有关盆地演化的物理、化学状态和时间、空间参数的盆地定量分析方法。

盆地定量地质分析可为盆地数值模拟提供控制参数,它是一种盆地特征自动提取方法,主要包括构造分析、自动地层对比和沉积相分析等。

对已获得的各种地质、地球物理和地球化学资料进行分析、综合,可以获得盆地分析和油气勘探所需各种数据;定量地质分析侧重于参数的提取方法研究,它是盆地模拟的基础。在盆地资源勘探过程中花费的成千上万元的资金所获得的资料,其价值远远大于目前所利用的价值,有效地利用和开发这些信息资源将会使已有的投入获得更多的回报。

五、研究现状与发展趋势

1. 研究现状

通过沉积盆地建模和盆地地球动力演化模拟,人们对盆地的演化和形成模式有了深刻的认识。世界范围内的科学家在盆地地质模型的基础上进行了广泛的盆地数值模拟研究,在盆地充填模拟、沉积过程、盆地构造、盆地形成演化的地球动力学过程等方面均取得了许多重要进展。

(1) 盆地构造模型和模拟。目前已有许多模型用于描述挤压盆地、伸展盆地的构造模型, Duvison (1986) 根据层长平衡原理建立了伸展盆地构造模型, R.M. Darros (1993) 提出了模拟盆地构造的数值解法。Kusznir、Weissel 和 Karner (1989) 在伸展盆地数值模型和模拟方面开展了许多有重要意义的研究工作。Chevron 提出的 Chevron 法在建立挤压或伸展盆地构造模型中得到了广泛采用。I.O. Goodluck (1998) 等人讨论了犁式正断层的力学分析方法。

(2) 沉积过程模拟。文献中有大量该方面研究成果的报道, D.M. Tetzlaff 和 Harbaugh (1985) 根据流体运动的流动方程和动量方程对主要碎屑沉积环境的沉积过程进行了深入研究, 开发了沉积模拟程序, 取得了许多重要意义的研究进展, 其研究成果是具有代表性的。

(3) 盆地充填。R.W. Schlische 等人 (1990) 建立了大陆伸展盆地的定量充填模型, 讨论了在不同伸展条件下, 盆地的充填特征和充填样式。J. Lambiase (1990) 和 M.R. Rodgers (1988) 讨论大陆裂谷盆地构造对湖相沉积的控制模型。

(4) 盆地地球动力学过程模型和模拟。盆地地球动力学模型和模拟数十年来一直是一个活跃的研究方向, 该方面的研究成果不断涌现, 盆地形成的纯剪模型 (Mckenzie, 1978)、简单剪切模型 (Wernick, 1985)、剥离断层模型 (Lister, 1991) 是有关伸展盆地形成模型的里程碑式的著名研究成果。近年来, 在已有研究的基础上的更为详细的盆地动力学模拟和针对具体盆地的盆地地球动力学模拟研究也不断出现, 例如: P. Tom 等人 (1992) 讨论了有限伸展与上升地幔的降压熔融之间的关系模型; P. Jeffrey (1998) 等人对中部和北部贝加尔湖裂谷开展了综合模拟研究等。

利用计算机开展盆地定量分析的研究也不断增多, 目前的研究主要集中在沉积相分析方面, 在提供盆地构造、盆地演化的状态信息方面的研究还比较少。

2. 发展趋势

沉积盆地计算机分析的理论、方法和技术正在不断发展,人们正在从更深入的角度研究盆地形成演化,盆地特征及其控制因素之间的关系。如壳下底垫体的形成原因、火山岩形成与盆地演化之间的定量关系、岩石圈的横向不均一性对盆地形成和演化的影响。其主要发展趋势如下。

(1) 建立新的盆地模型。尽管目前已有多种盆地模型可以用于模拟盆地构造和盆地形成和演化的地球动力学过程,但在许多情况下,这些模型仍不能很好地预测盆地的基本特征。松辽盆地是一个典型的例子,虽然关于松辽盆地形成模型的讨论很多,但到目前为止,关于松辽盆地的形成模式仍然是一个未解之谜,任何已有的典型盆地形成模型都不能对松辽盆地的几何形态、地质特征和演化历史给出很好的解释。

(2) 开展精细的大尺度盆地模拟。初始的盆地模型可以对盆地形成演化的地动力学特征给出一级近似,但是,根据这些模型还不能模拟沉积盆地构造、沉积和热演化的许多重要细节。油气资源勘探、开发要求盆地模型能够预测更多的盆地细节,这就要考虑更多的控制因素。如盆地基底或岩石圈的横向不均一性与盆地构造格局、盆地形成演化之间关系,盆地形成演化与深部地质过程、岩浆活动之间的关系等。

随着科学技术的进步和大量有关盆地基础地质、地球物理资料的获得,有可能建立更精细的盆地模型和开展高时空分辨率的盆地地质过程模拟,并在此基础上获得更精细的、具有更高时空分辨率的模拟结果。

(3) 三维大尺度盆地计算机分析。从一维、二维盆地定量分析到三维盆地定量分析是一个质的飞跃,三维盆地计算机分析能获得更客观、可靠的结果。在一维、二维的情形下,只需较少控制参数即可完成分析工作,而在三维情况下,必须考虑三维热传导、热对流、三维空间盆地构造活动的不一致性、盆地基底的不均一性、水动力条件的空间变化等复杂情况,这使三维盆地计算机分析成为具有挑战性的研究方向。许多学者在这方面开展了探索性研究,并取得了一定研究成果,如利用有限元法对沉积过程、盆地构造作用进行模拟等。

(4) 引入非线性动力系统和分形几何学的概念和理论。非线性动力学和分形几何学在认识复杂自然现象过程中发挥着强大作用。盆地动力系统的演化具有复杂的非线性动力学特征,在盆地系统演化过程中所形成的盆地构造、沉积充填具有明显的自相似结构。如果在盆地模型和模拟中结合非线性动力系统和分形几何学的理论和方法,可以获得更可靠的盆地构造、沉积和地球动力学模拟结果。

(5) 综合模拟研究。目前盆地地质过程模拟主要是从盆地构造、盆地充填和盆地动力学过程等单个方面开展的。由于所涉及的研究尺度的不同和所采用的方法不同,把各种模拟方法融合在一个统一的框架下仍存在一定困难。对盆地的全面认识,需要把盆地动力学、构造和沉积过程模型结合在一起,在统一的时空框架下重建盆地的形成和演化历史,这是大尺度盆地计算机分析的重要研究方向之一。

(6) 开发有效地提取盆地参数的自动方法。对大量的地质、地球物理资料进行有效分析,并提取对认识盆地形成演化及盆地地质特征对盆地计算机定量分析有着十分重要的意义。这包括常规的数据分析方法和人工智能分析方法。沉积盆地计算机构造分析方法、沉积地层构造和地层自动分析为从大量的勘探开发资料中获得有用信息提供了一种高效的手段。

(7) 建立大尺度盆地计算机信息系统。大尺度盆地计算机信息系统的建立是开展大尺度

盆地分析的基础，其研究方向是开发一个可扩展的、具有统一标准的盆地地质、地球物理资料数据库系统，该系统应与大尺度盆地模拟和自动分析系统具有良好的数据接口。

(8) 开展大尺度盆地计算机可视化研究。利用三维可视化技术可以显示盆地的静态模型和动态演化过程，加深人们对盆地的认识，使研究者能够身临其境地了解盆地、分析盆地。

第二章 盆地动力系统及其特征

第一节 盆地动力系统

盆地是在地壳相对下沉而在地球表面形成的凹陷地区,是被沉积物充填的岩石圈地壳的一个块段。盆地动力系统是一个包括沉积盆地及其下的地壳和地幔在内的动力系统,它对区域构造应力场、深部地球物理状态和外部条件的变化是敏感的,并沿着特定轨迹演化。盆地动力系统是由深部动力系统和外部动力系统组成的,内部动力系统控制着盆地的总体发展趋势,如盆地的形成、演化和衰亡,深部动力系统控制着盆地的沉积充填作用。

根据盆地形成的力学机制,沉积盆地主要可以分为四种类型:与引张作用有关的伸展盆地、与挤压作用有关的挤压盆地、与剪切作用有关的走滑盆地和位于克拉通内部的与热作用相关的克拉通盆地。与之相应存在着伸展、挤压、走滑和克拉通盆地动力系统,以及伴随着走滑作用的伸展、挤压复合型盆地动力系统。

盆地总是处于一种不断发展变化中,其整个生命期是从地壳沉降沉积开始到盆地内的地层褶皱隆升。探索盆地演化的各个阶段是建立盆地的地质模型和数学模型的基础。盆地动力系统的模拟应当是动态的。对盆地的计算机定量数值分析应以详细的地质数据为基础。

从盆地动力系统的角度研究盆地有助于全面认识盆地特征及其形成和演化,以及有利于发现、开发和利用沉积盆地中所蕴藏的资源。本章主要讨论了伸展盆地动力系统及其特征,其他盆地动力系统及其特征与之类似。

一、盆地动力系统的形成

盆地演化是一个构造与沉积的综合作用过程,包含了区域构造过程、深部作用、热动力状态、沉积作用及其相互影响,其中前二者是沉积盆地演化的主导因素。具有不同构造活动方式的盆地有着不同的沉积响应。盆地几何形态、构造样式、沉积充填样式、沉积序列和同沉积变形等特征记录了沉积盆地动力系统的形成和演化过程。

一个沉积盆地系统可能以不同的形式开始,或由于热扰动,或由于引张或挤压,在盆地演化过程中,热作用和构造应力是盆地演化的主要动力。热作用和构造应力是相互关联的,热作用可以使地壳隆起,在隆起地壳的顶部产生引张应力,使岩石圈伸展。伸展作用可以使岩石圈减薄,地幔和软流圈顶面隆升,改变盆地地区岩石圈的温度结构,从而又影响着岩石圈的热效应。对大陆伸展盆地而言,区域引张应力所产生的伸展作用是被动伸展盆地演化的主导因素,伸展作用的意义不仅使岩石圈减薄、破裂和沉降形成盆地,而且还引起了深部物质的重新分配,扰动了岩石圈的温度场,这种变化破坏了岩石圈原有的平衡结构,这种不平衡是盆地演化的动力,一旦产生这种不平衡,那么就建立了一个盆地动力系统。对挤压盆地而言,区域挤压应力使岩石圈发生断裂、推覆、岩石圈发生重叠,产生了岩石圈温度场热扰动,在岩石圈推覆或上冲的前缘产生挤压盆地。

在一些情况下,盆地动力系统是在较短时间内,通过快速的构造过程建立的。而在另一些情况下,盆地动力系统的建立则经历了较长时间的构造作用。盆地动力系统的建立过程,

决定了盆地的演化过程。构造作用的强度和持续时间，决定了盆地动力系统的演化能量。目前我们对盆地动力系统的认识是建立在岩石圈深部地质变化与岩石圈伸展或压缩作用的关系上。岩石圈伸展或压缩是否还会诱发地幔物质流动，甚至产生局部小规模地幔对流仍然是一个未知数，为什么一些大陆伸展或裂谷盆地发展为大洋，而另一些则在大陆裂谷发展阶段就夭折了，这意味着是否还存在其他驱动盆地演化的动力机制的可能性。这仍然是一个需要进一步研究的问题。

二、伸展盆地动力系统演化及其控制因素

断陷、沉积充填、莫霍面和岩石圈/软流圈界面的抬升是在不同层次上对伸展作用的响应，盆地综合模拟已经建立了盆地演化过程中物质和能量的平衡关系。沉积盆地动力系统的演化可以划分为两个基本过程（图 2-1-1）：①主动过程，该过程是一个能量的累积过程，当外在驱动力撤消之后，盆地则依靠这些已经聚集的动力发展；②被动过程，该过程趋向于使沉积盆地与周围环境达到新的平衡，其主要表现为岩石圈温度降低，盆地进一步冷却下沉，在盆地深部的沉积物被压实，密度趋向于周围岩石。在深部，莫霍面和岩石圈/软流圈的界面下降。

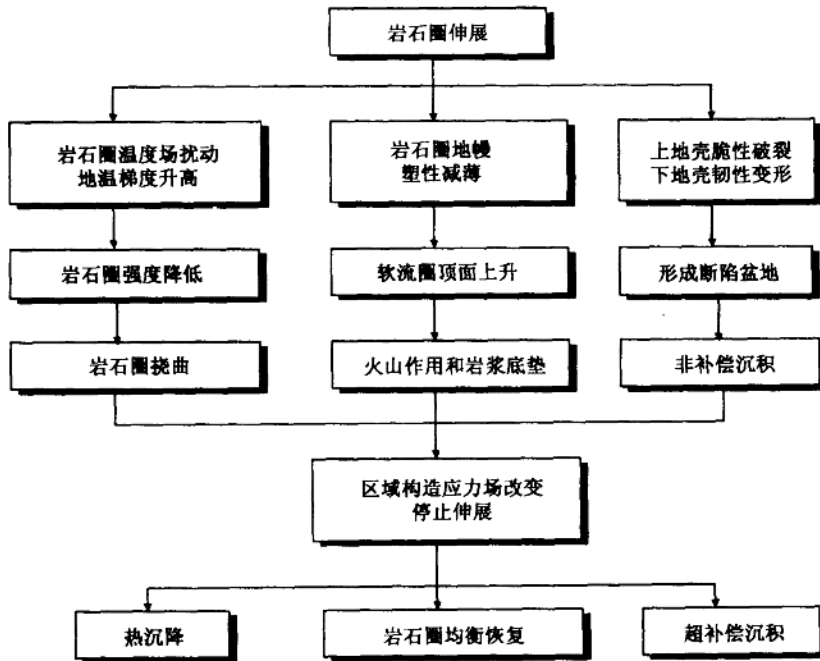


图 2-1-1 伸展盆地动力系统形成和演化

伸展作用是大陆伸展盆地的驱动力和控制盆地发展的主要因素。伸展作用使岩石圈上部通过简单剪切作用而减薄，形成断陷盆地，在深部使莫霍面和岩石圈/软流圈界面抬升，岩石圈温度场改变。在图 2-1-1 所示的盆地演化的任何一个阶段，外部的构造扰动均会影响盆地演化进程，有些盆地就是在一种复杂的、多变的构造应力场中形成和演化的。例如，在总体伸展背景下的挤压作用或走滑作用的影响。但是对中国东部的大多数中生代盆地来说，

引张伸展是推动盆地演化的主要动力,并且我们可以对挤压和/或剪切走滑作用对伸展盆地的影响作出评价,以便得出较为可靠的结论。

Garry D.K 和 Neal W.D (1993) 等在把岩石圈看作是弹性板的假设基础上,对挤压作用对伸展盆地的影响作了定量研究,他们认为挤压作用使盆地变深,并使盆地翼部抬高。走滑作用对伸展盆地演化的影响也是明显的,主要表现在两个方面:①使伸展盆地沿走向呈断块状,这对沉积过程有很大影响,断块状盆地格局阻断了盆地之间沉积物供给和水流体系的联系;②使这些断陷盆地集中分布在走滑断裂带上,形成了深度较大的断陷带,这种伸展作用加走滑作用的盆地的形成模式对岩石圈温度场、岩石圈强度以及沉积充填过程的影响尚有待进一步深入研究。

盆地深部作用主要是受伸展作用控制的。从盆地演化的地球动力学模型中可以看出,莫霍面和岩石圈/软流圈界面抬升是受伸展作用控制的,伸展作用越强,莫霍面和岩石圈/软流圈界面抬升的幅度越大,岩石圈的强度越低。

第二节 伸展盆地动力系统的基地质特征

对大陆伸展盆地或裂谷盆地的基地质特征已有许多系统总结,典型的裂谷盆地具有垂向沉积序列的双层结构、双水流体系、同沉积断裂活动、纵向和横向上的剧烈相变、巨大的厚度和厚度梯度及强烈的火山活动等基本特征,在深部则表现为莫霍面的隆起。根据近年来作者对中国东部中生代大陆伸展盆地的系统研究,及所获得的大量深部地质信息,除了上述基本特征以外,大陆伸展盆地还具有以下几个方面的特征。

一、壳内拆离带

在大陆伸展盆地的形成演化过程中,地壳的拆离作用是盆地深部构造活动的一种主要形式。中国东部的松南—辽北地区深部反射地震和大地电磁测深资料均揭示了在中下地壳内普遍存在着壳内拆离带。壳内拆离带在大陆伸展盆地的形成演化过程中起着重要的控制作用。

二、岩石圈/软流圈界面的隆起

除了莫霍面的起伏与沉积盆地有着明显的对应关系外,岩石圈/软流圈界面与沉积盆地之间的关系也是十分明显的,而且能够比莫霍面更敏感地反映伸展盆地的深部地质过程(详见第六章第三节)。一般而言,盆地沉降幅度越大,岩石圈/软流圈界面隆起幅度越大。岩石圈/软流圈界面隆起中心与盆地沉降中心之间可以是对应关系,也可以有一定的偏移,二者之间的关系是由盆地的形成模式决定的。一般主动型裂谷盆地沉降中心与岩石圈/软流圈界面隆起中心之间没有明显的偏移,而被动型裂谷沉降中心与岩石圈/软流圈界面隆起中心之间存在着一定偏移。

三、盆地的剖面形态不对称性

不对称性是岩石圈伸展过程中构造驱动力的方向性和块体运动空间综合平衡的反映。在盆地尺度和单个断陷盆地尺度上都具有一定的不对称特征,这种不对称特征在中国东部中、新生代盆地表现得尤为明显。辽河盆地外围地区主要发育了箕状和不对称断陷盆地,由于这种不对称性,造成沉积体系和沉积相分布的不对称性。

四、构造沉积序列

沉积相的变化既可以主要是由沉积过程引起,也可以是由构造活动所引起的,所以从沉积序列判别盆地的构造演化是困难的,但是如果把构造活动与沉积相的变化进行综合分析,就有可能分离出构造作用和沉积作用对一个沉积序列形成的影响。我们可以把一个沉积相序分为伸展的和稳定的两种基本类型,例如对于滨湖→浅湖→深湖这样一个序列,它既可以是稳定的,也可以是伸展的。如果这个相序是在伸展过程中形成的,那么该相序的产生主要是构造活动的结果。如果它是在稳定状态下形成的,那么,它主要是由沉积过程所造成的。沉积时的构造状态可以通过层形态和构造沉积学模拟研究来确定(详见第五章),辽西—松南地区的构造沉积序列可以很好地说明构造沉积序列的意义。

第三节 盆地系统的非线性特征

以混沌和分形几何学为代表的非线性理论是揭示自然界复杂现象的重要手段,在盆地形成演化过程中所形成的各种地质现象均具有自相似结构特征。通过研究各种地质现象的分形几何学特征,探索各地质变量之间的内在规律,可以为盆地分析开辟新的研究途径。将以混沌和分形几何学为代表的非线性理论引入盆地研究中将会把盆地计算机定量分析技术推向一个新的高度。对沉积盆地几何形态、沉积序列分形几何学特征以及沉积盆地非线性动力学特征的分析为我们深入研究盆地开辟了新方向。

一、自相似、分形和混沌

混沌和分形是20世纪80年代在探索自然界复杂现象过程中出现的新概念。作为一种科学方法和哲学思想,受到了世界各国科学工作者的普遍关注,并把该理论广泛应用于自然科学和社会科学各种复杂现象的研究中。分形和混沌理论在地震预报、天气预报以及解释和描述自然界的一些复杂现象,如闪电的形状、海岸线的形状方面均显示了强大的作用。目前这些理论正日益广泛地应用于地学的各个领域,并取得了许多重要进展。

目前有关分形(fractal)与混沌(chaos)的研究普遍存在于各种科学文献中,主要是因为它们提供了一个极富诱惑力的希望,即复杂现象可以分解成更简单的小现象,从而可对它们作进一步分析。分形促进了对许多不同类型的复杂系统的研究。

自然界中普遍存在着自相似结构,分形可以描述不同观察尺度上具有自相似结构的体系。美国科学家B.B.Mandelbrot首先认识到自相似在自然界中的普遍性,于1977年提出了分形的概念,建立了分形几何学。分形几何学是用来描述这样的体系:当我们扩大观察范围时,增加的细节重复出现,这些新的更大尺度上重复出现的结构与我们在小范围内观察到的结构是相似的,分形几何学为描述自然界中复杂现象提供了一种新的手段。图2-3-1是

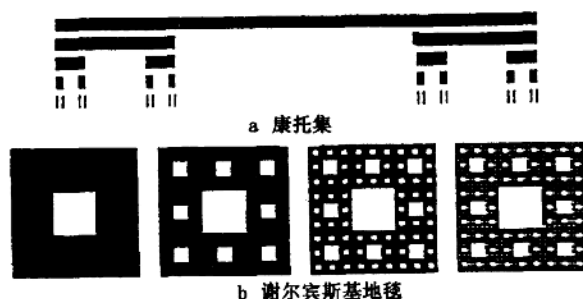


图 2-3-1 典型分形

典型的具有自相似结构分形的例子——康托集和谢尔宾斯基地毯。康托 (Cantor) 集是分形的严格数学例子 (图 2-3-1a)，它是这样构造的，将单位区间分割为三等份，将中间的一份去掉，尺度为 $1/3$ ，然后再将剩下的两段分别分成三份，并去掉中间一份，尺度为 $1/6$ ，以这种方式不断递归地构造下去就形成著名的康托集。在不同观察尺度上，康托集的结构是相似的。点的维数为 1 维，平面的维数为 2 维，而康托集的维数是分数，为 0.6309。分数维是具有自相似结构的几何对象的重要参量。分数维刻画了分形结构的重要几何特征，可以定量地描述事物内部的复杂性。

自然界的分形一般不满足任意缩放自相似这个判据。与康托集不同，自然物体一般不是严格的自相似，它不是由它自身的精确复制品组成的。Mandelbrot 引入了统计自相似的概念，作为自然界物体的更一般和更逼真的模型。在一个“统计自相似”的物体中，组成物体的各部分具有和整体一样的结构，只是根据某个比例缩小的精确复制品发生随机变化。图 2-3-2 是一些实际的例子，从这些例子中可以容易地看出，在不同尺度上、结构上的自相似。

混沌是指确定性中的随机性，由混沌运动所产生的自然现象具有分形结构。奇异吸引子具有分形结构。非线性动力学研究表明，复杂动力系统的吸引子 (Attractor) 也具有分形结构，可以用分维进行描述，所谓的吸引子是指在由变量构成的相空间中，系统的瞬时状态为一个点，状态的变化为一条轨道，如果系统状态可约化为一组确定性的规律，则随时间 t 的增长，它将达到一个永久动态，相轨道收敛于相空间的一个子集，该子集称之为混沌吸引子。当吸引子的维数 $d=1$ 时，系统处于周期振荡，当 $d=2$ 时，为两种不可约频率的准周期振荡， d 不为整数或大于 2 时，系统表现为一种对初始状态敏感的混沌振荡。

第一个显著的混沌系统是洛伦兹 (Edward Lorenz) 于 1962 年观测到的 (图 2-3-3)，当时他正在为进行气象预测而研究大气中气流运动的简化数学模型。

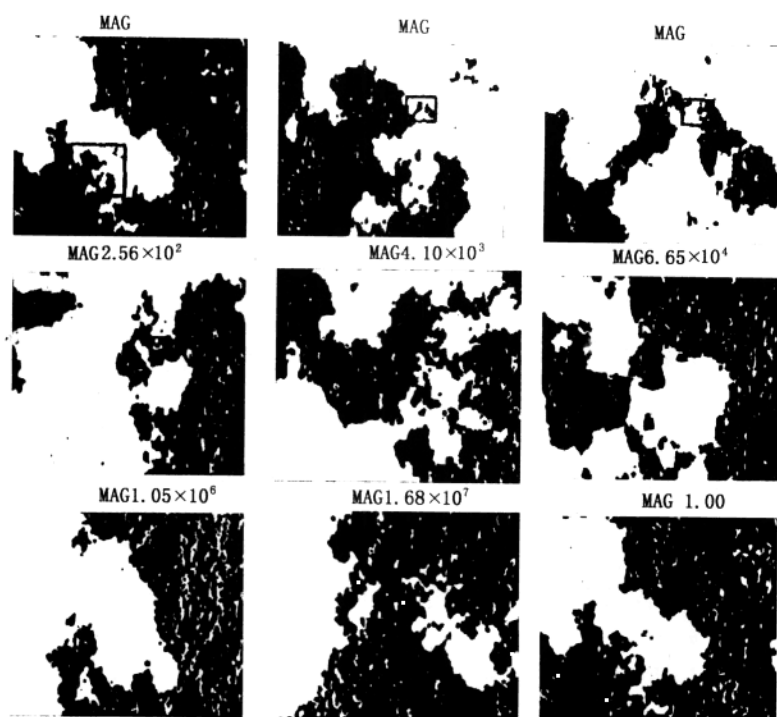
混沌系统具有的特征：

- (1) 系统的输出表现为不可预测性，即使可以预测，也将是非常困难的。
- (2) 输出对输入非常敏感，即使有非常小的输入值变化也会引起很大输出值的变化。

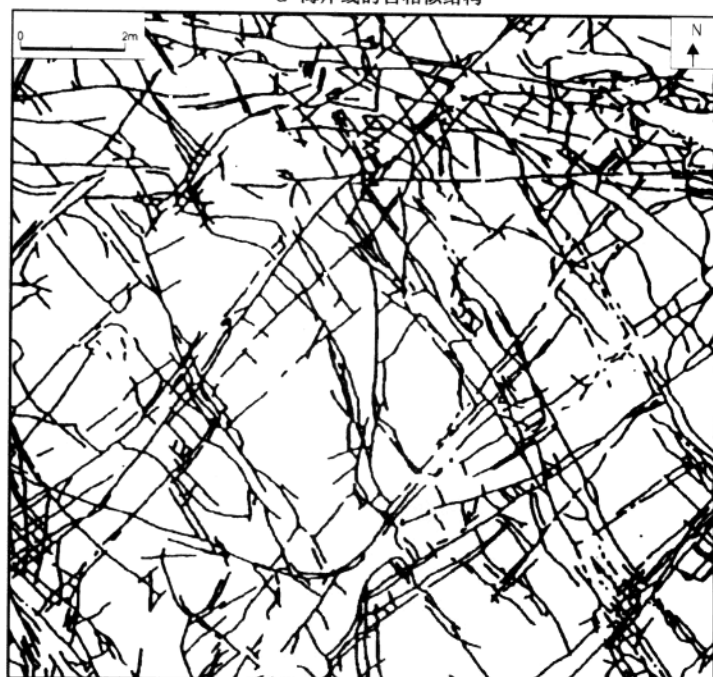
从预测天气、股票市场或全球经济，到描述星际核反应行为，或描述分子间复杂的相互作用，混沌系统是普遍存在的。混沌系统的研究就是从一种明显的无序中找出有序的一种尝试。即使不能精确地预测某个系统的行为，或许也能够对系统所呈现的输出划定边界或描述系统的长期行为。

极其复杂的输出可能源自非常简单的系统。人们倾向于认为复杂的行为都来自于复杂的规则。现在我们知道，即使比较简单的方程也能产生像 Mandelbrot 集一样的复杂的奇妙输出。许多系统的复杂行为可能是由简单的规则所控制的。

吸引子有三种类型：第一类为不动吸引点。第二类为周期性吸引子，系统在其中沿着一条有限长的闭合曲线运动。一旦系统达到周期吸引子，它将保持在这条曲线上，并且随着递归的进行系统只沿着曲线移向不同的点。最通常的周期吸引子是围绕恒星运动的行星轨道。一旦系统进入某条轨道，它将保持其椭圆轨道围绕中央恒星运动。第三类既不是不动点也不是周期性的吸引子称为“奇怪吸引子”。奇怪吸引子是具有无限长度的完全确定的路径。换言之，一旦系统达到了奇怪吸引子的某个状态，它将保持在该奇怪吸引子上，但无论进行多少次迭代运算，系统决不重复达到相同的状态。在大多数令人感兴趣的情况下，奇怪吸引子是一些分形曲线。



a 海岸线的自相似结构



b 断裂构造的自相似结构

图 2-3-2 分形的实例