



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Principles of Sedimentary Basin Analysis

沉积盆地分析基础

解习农 任建业 主编



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

沉积盆地分析基础

Principles of Sedimentary Basin Analysis

主 编：解习农 任建业

编 者：王 华 陆永潮 庄新国 焦养泉

姜 涛 张 成 杜学斌



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

沉积盆地分析基础/解习农,任建业主编. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2013.10
ISBN 978-7-5625-3034-3

- I. ①沉…
- II. ①解…②任…
- III. ①沉积盆地-高等学校-教材
- IV. ①P531

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 062357 号

沉积盆地分析基础

解习农 任建业 主编

责任编辑:王 荣

选题策划:张晓红

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电 话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:880 毫米×1 230 毫米 1/16

字数:828 千字 印张:26.125

版次:2013 年 10 月第 1 版

印次:2013 年 10 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3034-3

定价:48.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

沉积盆地是人类最重要的资源宝库,蕴藏着丰富的化石能源、沉积矿产以及水资源。正是因为人类社会对矿产资源的大量需求推动盆地分析领域的快速发展,使得地质学家在多年研究沉积盆地及相关资源的过程中,总结形成了盆地分析的理论和方法体系。沉积盆地分析不仅可以揭示不同类型化石能源、沉积型层控矿产、砂岩型铀矿等资源的分布规律,为矿产勘探提供直接依据,而且能为大地构造演化过程、重大构造事件、全球环境变迁及气候演变研究提供丰富的资料和详细的证据。

沉积盆地分析是一项重要的基础地质工作,其主要目的在于认识盆地成因及其沉积充填特征,揭示其形成演化历史中的动力学过程。对能源资源的需求是推动这一学科发展的最主要的驱动力,特别是由于油气勘探的高难度及其在国民经济中的战略地位,吸引了多学科在盆地能源研究领域聚焦,并采用了先进技术及方法,使盆地分析具有多学科的综合性和交叉性。

沉积盆地分析基础是为高年级本科生开设的一门专业课程。本书分为盆地沉积充填分析、盆地形成演化分析、盆地热史及流体分析三部分。在内容编排上侧重于基本理论、概念及方法介绍,并偏重于含油气盆地领域。许多较为专门的部分则需要参考更多的相关文献以作深入地了解。盆地分析是一门多学科交叉且实践性很强的学科,这就需要在掌握基本概念和方法的基础上,还要熟悉地球物理,特别是地震和测井资料的解释,掌握地球化学及计算机模拟等相关知识。

本书是在中国地质大学沉积盆地及沉积矿产研究所编写的《沉积盆地分析基础》(1997)校内教材的基础上扩充、修改完成。本书由解习农和任建业统稿,其中第一章、第四章由解习农执笔,第二章由解习农、焦养泉执笔,第三章由陆永潮、王华执笔,第五章由杜学斌执笔,第六章至第十章由任建业执笔,第十一章由佟殿君执笔,第十二章由庄新国执笔,第十三、第十五章由姜涛执笔,第十五章由张成执笔。雷超参加了第四章部分内容的编写。

由于编者水平有限,书中错误之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2012年12月20日

目 录

第一章 盆地分析概念体系与研究思路	(1)
第一节 沉积盆地分析概述	(1)
一、沉积盆地基本概念	(1)
二、沉积盆地分析发展历史及研究进展	(2)
三、沉积盆地分析内容及其研究意义	(6)
第二节 沉积盆地分析的基本参数	(8)
一、盆地形态参数	(8)
二、盆地沉积参数	(8)
三、盆地流体参数	(11)
四、盆地构造参数	(12)
五、盆地热史参数	(13)
六、盆地成矿参数	(15)
第三节 盆地分析思路与方法	(15)
一、沉积盆地分析思路	(15)
二、沉积盆地分析主要方法	(17)
三、沉积盆地分析流程	(21)
第二章 沉积体系分析	(23)
第一节 沉积体系的概念和分析方法	(23)
一、基本概念	(23)
二、沉积体系分析方法	(26)
第二节 沉积体系分类及其主要特征	(33)
一、沉积体系分类	(33)
二、陆相沉积体系组	(34)
三、海陆过渡相沉积体系组	(46)
四、海相沉积体系组	(53)
第三节 沉积体系空间配置	(63)
一、断陷盆地沉积体系空间配置特征	(63)
二、前陆盆地沉积体系空间配置特征	(65)
三、克拉通盆地沉积体系空间配置特征	(66)
四、碎屑岩大陆边缘盆地沉积体系空间配置特征	(69)
第三章 层序地层分析	(71)
第一节 层序地层基本原理	(71)
一、层序地层学基本概念与术语	(73)
二、盆地等时地层格架	(77)
三、层序地层单元构成特征	(78)

四、层序地层单元划分	(85)
第二节 层序构成样式	(88)
一、碎屑岩层序构成特征	(88)
二、碳酸盐岩层序构成特征	(96)
三、陆相盆地层序构成特征	(112)
第三节 层序形成的控制因素	(114)
一、构造沉降	(114)
二、相对海(湖)平面周期性升降	(116)
三、沉积物供给量	(117)
四、古气候	(118)
第四章 源-汇系统分析	(120)
第一节 剥蚀区域物源区分析	(121)
一、沉积盆地源区剥蚀过程及其深部响应	(122)
二、物源区分析的应用	(125)
第二节 搬运区域的沉积物搬运通道体系分析	(127)
一、沉积物搬运通道体系	(127)
二、陆源沉积物通量及其影响因素	(129)
三、沉积物搬运通道体系重建	(131)
第三节 沉积区域陆海相互作用分析	(132)
一、大陆边缘沉积作用分析	(132)
二、深水沉积作用分析	(133)
第五章 盆地充填分析编图方法	(135)
第一节 物源区分析方法	(135)
一、物源区分析主要内容	(135)
二、物源区分析具体方法	(135)
第二节 古水流分析方法	(147)
一、古水流分析主要内容	(147)
二、古水流分析具体方法	(147)
第三节 沉积体系分析编图方法	(154)
一、单井或野外剖面沉积特征观察与描述	(154)
二、单井或野外剖面沉积体系分析编图	(156)
三、岩石类型或比率平面图编绘	(157)
第四节 层序地层学分析编图方法	(165)
一、层序界面分析及层序单元划分方法	(165)
二、盆地充填序列编图	(170)
三、骨干剖面-沉积断面图编制	(172)
四、沉积体精细刻画编图	(173)
第六章 盆地类型及其发育的动力学背景	(179)
第一节 盆地沉降作用	(179)
一、盆地沉降机制和类型	(179)
二、盆地沉降中心及其与沉积中心的关系	(180)

第二节 沉积盆地的成因类型	(181)
一、概述	(181)
二、沉积盆地的成因分类	(182)
第三节 沉积盆地发育的板块构造背景	(184)
一、沉积盆地的板块构造分类	(184)
二、各类盆地的基本特征	(185)
第四节 沉积盆地构造样式	(192)
一、构造样式的概念	(193)
二、构造样式的分类	(193)
三、构造样式的复合与叠加	(197)
第五节 沉积盆地的叠合演化和深部活动	(197)
一、沉积盆地的叠合演化	(197)
二、地幔对流系统与盆地演化	(198)
第七章 伸展型盆地	(200)
第一节 岩石圈伸展作用模式	(200)
一、伸展型盆地的基本概念	(200)
二、岩石圈伸展作用模式	(201)
第二节 伸展型盆地同生构造样式	(208)
一、同生构造的类型	(208)
二、同沉积断裂	(209)
三、伸展型盆地内的同生褶皱	(219)
第三节 断陷盆地构造沉积演化模式	(223)
一、陆相断陷盆地构造沉积演化	(224)
二、海相断陷盆地构造沉积演化	(227)
第八章 挠曲类盆地	(230)
第一节 岩石圈的挠曲作用及其形成的盆地类型	(230)
一、岩石圈的挠曲作用	(230)
二、挤压盆地的类型	(233)
第二节 前陆盆地的概念和类型	(233)
一、周缘前陆盆地	(234)
二、弧后前陆盆地	(234)
第三节 前陆盆地系统及其沉积充填序列	(234)
一、前陆盆地系统的结构单元和沉积构成	(234)
二、前陆盆地的沉积充填序列	(237)
第四节 前陆褶皱冲断带构造变形及其组合样式	(237)
一、概述	(237)
二、断层相关褶皱	(239)
三、逆冲断层系统	(247)
四、前陆褶皱冲断带的横向结构变化	(249)
第五节 前陆盆地的发育机制和过程	(251)
一、前陆盆地发育演化的主要控制和影响因素	(251)
二、与幕式逆冲有关的地层模型	(255)

三、前陆盆地的构造沉积演化过程分析	(258)
第九章 走滑带盆地	(262)
第一节 走滑断层概述	(262)
一、基本概念	(262)
二、走滑断层的发育和结构分析	(263)
第二节 走滑带盆地类型和特征	(268)
一、走滑带盆地类型	(268)
二、拉分盆地和转换伸展盆地的发育模式	(268)
第三节 走滑盆地充填演化特征	(271)
一、盆地结构的不对称性	(271)
二、盆地沉积充填的不对称性	(272)
三、盆地沉降中心有明显的迁移性	(272)
四、快速沉降和幕式演化	(272)
第十章 沉积盆地中的盐构造和反转构造	(274)
第一节 盐构造变形	(274)
一、盐构造变形的基本概念	(274)
二、盐岩的物理性质	(274)
三、盐构造变形的类型和特征	(277)
四、盐构造模拟研究	(280)
五、盐岩流动的驱动力和阻力	(282)
六、盐底辟周缘构造	(283)
七、盐底辟作用机制和发育的区域构造背景	(285)
第二节 反转构造	(289)
一、反转构造的概念	(289)
二、反转构造样式	(291)
三、构造反转强度和反转率的测定	(291)
第十一章 沉积盆地构造分析技术和方法	(293)
第一节 盆地构造制图技术	(293)
一、盆地构造剖面图的编制	(293)
二、界面构造图的编制	(294)
三、盆地构造格架图的编制	(295)
第二节 构造活动性定量分析技术	(296)
一、断层生长指数法	(296)
二、断层古落差和活动速率	(299)
三、位移-距离法	(301)
四、断层相关褶皱的生长地层分析	(302)
第三节 沉降史分析	(306)
一、沉降史模拟的反演法——回剥法	(306)
二、沉降史模拟的正演法	(310)
第四节 平衡剖面 and 盆地构造演化图的编制	(313)
一、平衡剖面技术的基本原理	(314)

二、平衡剖面的几何学法则	(314)
三、建立平衡剖面的基本步骤	(315)
第五节 低温热年代学技术	(317)
一、裂变径迹定年方法的基本原理	(317)
二、裂变径迹退火特性	(319)
三、裂变径迹长度分布特征与热历史	(321)
四、裂变径迹技术在盆地反转构造研究中的应用	(322)
第十二章 盆地热历史分析	(324)
第一节 基本概念	(324)
第二节 盆地热历史研究方法	(324)
一、古温标法	(324)
二、模拟算法	(329)
第三节 热史在盆地分析中的应用	(329)
一、中国东部不同类型盆地的地温场特征	(329)
二、中国东部中生代盆地热体制及其地球动力学背景	(335)
三、盆地地温场特征对油气生成的影响	(336)
第十三章 盆地流体分析基本原理	(338)
第一节 盆地流体概述	(338)
一、盆地流体的成分	(338)
二、盆地流体的性质	(340)
三、盆地流体来源	(343)
第二节 盆地流体流动驱动因素	(346)
一、重力驱动	(347)
二、压力(压实)驱动	(347)
三、浮力驱动	(348)
四、构造应力和地震驱动	(349)
五、热对流驱动	(349)
第三节 盆地流体流动	(350)
一、盆地流体流动样式	(351)
二、盆地流体输导系统	(352)
三、盆地流体流动效应	(354)
第十四章 流体流动与成岩作用分析	(356)
第一节 成岩作用概论	(356)
一、成岩作用类型及其特点	(356)
二、成岩阶段划分	(361)
第二节 化学成岩作用基本原理	(366)
一、黏土矿物的成岩转化	(366)
二、石英的成岩转化	(367)
三、长石的成岩转化	(368)
四、碳酸盐矿物的成岩转化	(369)
第三节 盆地流体-岩石相互作用	(371)

一、盆地流体-岩石相互作用的主要机制·····	(372)
二、盆地流体-岩石相互作用的主要特征·····	(373)
三、盆地流体-岩石相互作用的地球化学模拟·····	(378)
第十五章 盆地流体模拟方法·····	(379)
第一节 盆地流体模拟概述·····	(379)
一、盆地流体模拟基本原理·····	(379)
二、盆地流体模拟基本模型·····	(380)
三、模拟参数分析及选取·····	(381)
第二节 盆地流体模拟实例·····	(387)
一、Basin2 软件工作原理·····	(388)
二、Basin2 软件所需参数·····	(389)
三、模拟结果分析·····	(389)
四、二次生烃与潮汕坳陷油气勘探前景·····	(391)
主要参考文献·····	(393)

第一章 盆地分析概念体系与研究思路

沉积盆地分析(sedimentary basin analysis)是地质学中的重要领域,它的主要研究对象是沉积盆地,包括盆地形成演化、沉积充填、盆地流体和沉积矿产成矿规律研究。盆地是能源矿床(煤、石油和天然气)和沉积矿床的赋存场所,从事能源研究的地质学家们早就认识到“没有盆地就没有石油”(Perrodon,1983)。这一重要见解后来扩大到层控金属矿床领域,因为越来越多研究成果发现盆地流体及其循环过程对成矿作用至关重要,也发现了金属成矿与古油藏水的成因有联系(李思田,1999)。近年来,我国一些含油气盆地相继发现大量砂岩型铀矿产资源。因此,盆地分析不仅具有重要的地质理论意义,而且与能源资源和其他沉积矿床的勘探有极为密切的联系。

第一节 沉积盆地分析概述

一、沉积盆地基本概念

盆地是地质学和地理学上常用的术语,但其含义略有不同。盆地地貌是地理学的术语,是指四周被自然高地所围限的地形上的洼地,代表一种地貌单元,它可以是大陆上区域分布的无覆水的洼地,如四川盆地,也可以是驻水的湖泊和海洋。

沉积盆地(depositional basin)是指地球表面发生构造沉降,并形成了沉积充填的地区。从广义来说,沉积盆地是指地壳上有沉积物或火山碎屑充填的地区,既可以接受物源区搬运来的沉积物,也可以充填火山喷出物质或火山碎屑物质以及盆内原地化学、生物或机械作用所形成的沉积物;从狭义来说,沉积盆地是指在漫长的地质历史时期能堆积并保存沉积物的地区。这一概念包含三个基本条件:①有沉积物或火山碎屑的充填;②在构造上是一个下凹的单元;③形态上基本为封闭的。

目前我们所观察到的沉积盆地有三类:①活动的沉积盆地,这些盆地现在仍然有沉积物充填,如珠江口盆地;②不活动的且极少破坏的沉积盆地,这些盆地现在已经没有沉积物堆积,但几乎没有受到变形,现今保存的轮廓基本上反映了其原始形态和沉积物充填特征,如中国东部部分新生代裂谷盆地;③强烈变形的沉积盆地,这些盆地沉积之后发生变形,使得目前保存的面貌明显不同于原始沉积时的面貌。

为了区分这几类盆地,Selley(1976)曾建议使用同沉积盆地(syn-depositional basin)和后沉积盆地(post-depositional basin)。前者代表原始沉积时的盆地,而后者则是由于后期构造运动所形成的构造盆地。当改造作用强烈,原始沉积盆地大面积被剥蚀后保存下来的盆地也被称为残留盆地。盆地内沉积物的搬运、沉积相的分布与后期构造运动无关。现今地球表面形成时代较早的盆地大多经历了多期构造变形和剥蚀,有的仅残留了原沉积盆地的一小部分。区分这两类盆地的另一有效标志是鉴别盆地边界类型,即是沉积边界(depositional margins)还是侵蚀边界(eroded margins)。同沉积盆地的原始边界为沉积边界,这类盆地边界往往有盆地边缘相,如冲积扇、辫状河、扇三角洲沉积;剥蚀边界则是经过后期改造剥蚀残留的边界(图1-1)。

世界上许多大型盆地是由不同地质时代、不同成因类型的盆地叠合而成的,其形态和边界常由后期相对年轻盆地的构造边界所决定。朱夏(1982)把这些不同时期形成的盆地单元称之为“盆地原型”(proto-type),如塔里木和四川盆地都是叠合盆地的典型代表,为中生代前陆式盆地叠合在古生代海

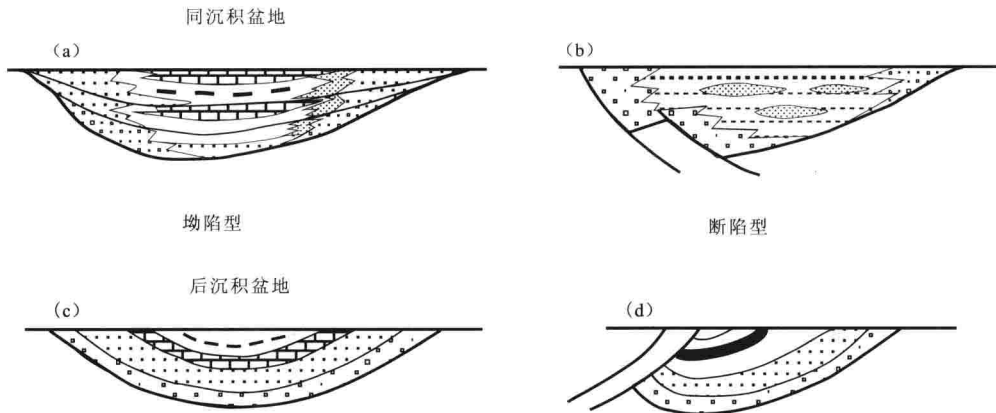


图 1-1 同沉积盆地(a,b)和后沉积盆地(c,d)(前者边缘性质为沉积边界)

相盆地之上(图 1-2)。不同时代、不同成因的原型盆地具有不同的构造样式和沉积充填特征,因此,叠合盆地分析需要识别出每种原型分别进行研究,这样才能客观地揭示不同时期构造演化的继承、改造和变格等具成因联系的复杂关系,合理地解释构造格局和沉积充填样式地差异性。

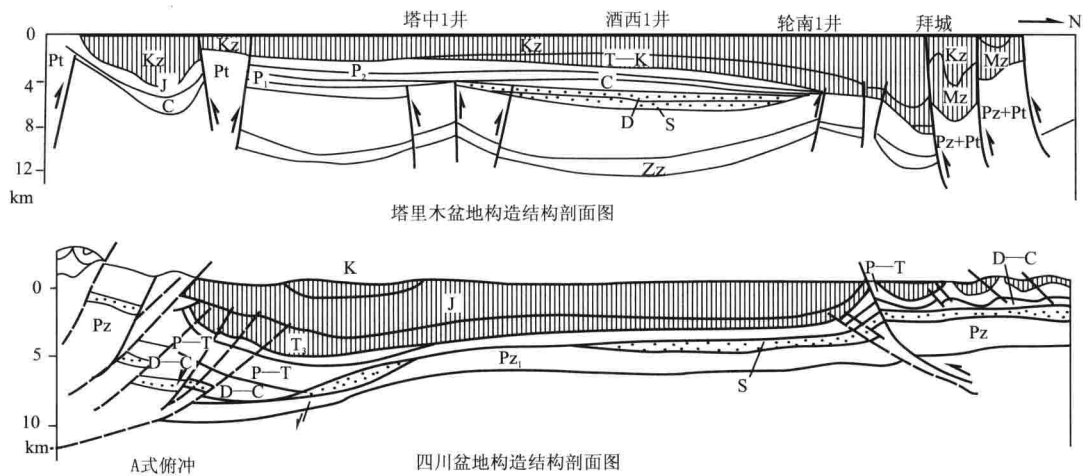


图 1-2 塔里木和四川盆地的结构特征——不同类型盆地的叠合关系(据赵文智等,2002;李德生,2002,改绘)

二、沉积盆地分析发展历史及研究进展

(一)沉积盆地分析发展历史

沉积盆地分析作为地质学中的重要领域,它是地质学家以沉积盆地为对象,在多年研究沉积盆地及相关资源过程中所总结形成的理论和方法体系。从概念的提出到原理和方法系统化,已有数十年历史。追根溯源,沉积盆地分析经历了三个阶段。

1. 盆地分析早期阶段

早在 20 世纪 60 年代初,Potter 和 Pettijohn 发表了《古流与盆地分析》专著(1963 年初出版,1977 年再版),首先提出了盆地分析的整体思想,并强调古水流体系在盆地分析中的重要性。随后,Conybeare(1979)在《沉积盆地岩性地层分析》中详细论述了沉积盆地岩性地层分析及其系统编图方法。

沉积盆地分析的早期发展主要属于沉积学范畴,地质家着重于研究盆地的沉积充填特征和盆地不同演化阶段的古地理重建。

2. 盆地分析综合研究阶段

板块学说的出现,给盆地研究带来了深刻的影响。人们从岩石圈板块的相互作用中重新认识了沉积盆地的成因和演化,使沉积盆地分析这一学科从概念体系到研究内容皆产生了巨大的飞跃。一些学者从板块构造与沉积的相互作用角度提出了新的盆地分类(如:Kingston等,1983;Mitchell和Reading,1986;Klein,1987),使得沉积盆地分析的内容和方法日益体现出沉积学和构造地质学等多学科的综合。

20世纪80年代以来,与之有关的国际会议不断召开,如1982年在加拿大汉密尔敦市召开的第11届国际沉积学大会,将“盆地分析的原理和方法”列为专门的分组。此后,一系列新的著作相继问世,如Maill主编的《沉积盆地分析原理》(1984,1990),Einsele主编的《沉积盆地:演化、相和沉积输入》(1992,2000),Kleinspehn和Paola主编的《盆地分析新进展》(1988),Allen P A和Allen J R主编的《盆地分析原理和应用》(1990,2005),Lerche主编的《盆地分析中的定量方法》(1990)。另外,AAPG(American Association of Petroleum Geologists)也组织编著了各类型盆地的系列专著,包括离散/被动大陆边缘盆地、克拉通内部盆地、活动大陆边缘盆地、前陆盆地和褶皱带、陆内裂谷盆地等(Leighton等,1991;Edwards和Samtognossi,1990;Landon,1994;Biddle,1991)。

我国学者早在20世纪70年代末和80年代就开始了断陷盆地分析,并形成独具特色的研究思路和方法体系(李思田等,1983),《断陷盆地分析与煤聚积规律》(李思田,1988)是当时这一领域的代表作。同时,许多中国学者在陆相盆地和大型叠合盆地领域也出版了大量有特色的著作(Zhu Xia,1983;李德生,1992;胡见义等,1991;田在艺,1996)。

3. 盆地分析蓬勃发展阶段——盆地动力学研究

20世纪90年代初期提出了沉积盆地动力学的重要学术思想,使盆地研究进一步深化。Dickinson(1993)提出:准静态的(quasistatic)盆地分类应该走向更具动力学意义和更具适应性的分类;盆地研究的集中点应从盆地分类转向盆地形成过程的动力学分析;并指出盆地演化常常是多重作用的联合控制,是多种作用的复杂函数。美国地球动力学委员会(USGC)聘请以Dickinson为首席科学家的专家组编写的《沉积盆地动力学》提出了具有前瞻性的沉积盆地研究纲要(Dickinson等,1997),突出了盆地分析的重大课题应与全球气候变化、流体流动和地球动力学密切结合。该纲要既强调了板块构造和地幔对流系统对盆地形成演化的控制作用,也强调了盆地流体以及盆地中古气候、古环境记录的研究。显然,盆地动力学成为地球动力学研究的重要组成部分,更强调对盆地形成演化中不同演化过程与动力学机制的理解。不难看出,从盆地分析到盆地动力学显示了研究重点从盆地基本要素及静态盆地分析转向盆地的过程和动力机制分析。

(二)沉积盆地分析现状及研究进展

20世纪60年代中期至今,对能源日益增长的需求,新的地质理论特别是板块学说的产生以及研究手段的发展,使得对沉积盆地的研究出现了持续不衰的热潮,从理论到实践都取得了大量成果,这对盆地分析原理和方法的发展无疑是巨大的推动力。特别是近20多年来,许多国际机构开展了多个与盆地分析相关的综合性研究项目。1989年3月,以美国地球科学家为首提出了1990—2020年为期30年的具有科学导向的“大陆动力学”研究计划,其中大型沉积盆地的成因和演化是重要的科学问题之一(许志琴等,2008)。由IUGS(International Union of Geological Sciences)和IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics)资助的国际岩石圈计划(International Lithosphere Program,ILP)将沉积盆地成因作为主要研究内容开展了持续20多年的研究,从1990年开始几乎每年召开1次工作会议(Cloetingh,1990;Roure等,2010)。从2005年开始,国际岩石圈计划以沉积盆地为主要研究任务开展全球

范围内的研究,来自大西洋、中东、非洲、环太平洋以及南半球的大学及研究机构的学者开展了一系列研讨,如环极地沉积盆地(Kirkwood 等,2009)、非洲盆地及其大陆边缘沉降与隆升(Bertotti 等,2009)、墨西哥湾及拉丁美洲与环太平洋盆地动力学,以及中东、亚洲、澳大利亚沉积盆地动力学(Roure 等,2010)。近年来国际岩石圈计划资助的 TOPO - EUROPE 计划开展的地球深部与地表过程研究也涉及到大量盆地动力学研究内容(Cloetingh 等,2007,2009)。此外,欧洲研究基金会还资助了大量与盆地动力学相关的研究课题,如 ESF - Integrated Basin Studies(IFS; Cloetingh 等,1995; Mascle 等,1998; Durand 等,1999)、EUROPROBE GeoRift(Stephenson 等,1996; Starostenko 等,1999,2004)、ESF - EURMARGINS 等。

近年来,我国实施了“华北克拉通破坏”和“南海深海过程演变”两个重大研究计划,其中盆地动力学分析是这些重大研究计划中的主要内容,相继涌现出一批新的研究成果(如:Gao 等,2008;汪品先等,2012;朱伟林等,2012)。

近 20 多年来,沉积学、海洋地质学、板块构造学以及其他学科的迅速发展,加之新技术和新方法的应用,使盆地研究进入了一个新阶段,即以过程和动力机制为特色的盆地动力学研究阶段,所取得的主要进展和成就大致可概括为以下几个方面。

(1)深水沉积学发生了飞跃发展。近年来海洋调查及深海油气勘探的深入,揭示了深海沉积作用的复杂性。深水区域不仅堆积了丰富的重力流沉积物,而且还发育了丰富的洋流或等深流沉积物。早期深水沉积仅局限于海底扇研究,即深海粗粒浊流和浊积岩沉积(Kuenen 和 Migliorini,1957)。起先仅限于砂质沉积,随着 20 世纪 90 年代被动大陆边缘(如巴西、墨西哥湾、西非、北海)深海油气的勘探,发现细颗粒浊流沉积构成了海底扇的储集层(Bouma,2000),于是认识到除粗粒浊积岩以外,还有富含泥质的细粒浊积岩发育。近年来,深水沉积区除海底扇沉积外,还发育有大量深水峡谷体系(Harris 等,2011)、大型块体流沉积(mass transport deposits,MTDs)以及超密度流(hyperpycnal flow,亦译高密度流)沉积。超密度流是深水重力流沉积的另一重要形式,当入海河水中悬移物浓度达到一定限度就会产生超密度流。山区中小型河口的洪水季节,最容易造成这种超密度流。这种超密度流入海以后,还会造成海底峡谷(submarine canyon),成为向深海输送沉积物的通道(Van Weering 等,2007)。此外,洋流或等深流作用是导致深海沉积物产生非重力驱动的搬运和沉积的重要机制之一。等深流是沿大陆坡海底等深线呈水平流动的远洋底流,是一种顺陆坡走向流动的底流,包括温盐环流和风驱环流(Hernandez - Molina 等,2011)。等深流是 Heezen(1966)在对北大西洋陆隆沉积物研究之后首先提出来的。等深积岩(contourite)随后被提出(Hollister 和 Heezen,1972)。Stow(2002)提出等深流沉积体系,认为它是海洋环境下和重力流沉积体系一样重要的沉积类型。在现代海洋中,常沿大陆边缘形成大型等深岩丘或等深岩席等一系列与洋流相关的沉积体。

(2)层序地层学发展迅猛。20 世纪 90 年代,层序地层学的概念和方法逐渐形成完整体系并已成为油气勘探中一种广泛应用的技术。层序地层学的兴起大大提高了对盆地整体的认识,等时地层框架的建立和精细的储层沉积学分析为盆地内部构成研究提供了更为有效的方法。尽管不同学者依据不同的资料,提出了不同的层序地层分析方法,形成了不同的流派(Vail 等,1988,1990;Galloway,1989;Johnson 等,1995;Cross 等,1999),但这些方法在特定的构造背景或沉积盆地都可以很好地应用(Catuneanu,2006)。目前,国际上在此领域已进入高精度层序地层学和地震沉积学分析阶段,前者是以四级、五级层序或高频储层为基本单位的层序地层分析方法,而后者则是一门在地质模型指导下利用地震信息和技术研究有关沉积体的三维构成及其形成过程的学科(曾洪流,1998;Schlager,2000;Eberli 等,2004)。地震沉积学可用于精细沉积体系三维几何形态、内部构成分析以及岩性预测,已在河流体系、海底扇研究中取得了广泛的成功,成为继地震地层学、层序地层学之后研究沉积岩及其形成过程的一门新技术方法,并已经显示出在油气勘探开发领域极其巨大的潜力。

(3)地球表层动力学快速发展深化了对沉积盆地源区剥蚀过程及其深部响应的认识。盆地物源区的剥蚀过程及剥蚀速率研究是沉积盆地分析的重要内容。在盆地物源区研究中,尤其物源区为造山带

的情况下,构造-气候-地球表层过程的系统分析成为研究中的关键问题(Molnar,2004;Willett,2010)。地球上起伏不平的山脉反映了构造抬升和剥蚀作用之间最强烈的相互作用,尤其在活动汇聚山链中,山坡的垮塌、河流下切、冲沟的形成及其他灾变事件,这些剥蚀作用控制了岩石圈表层岩石的分解和卸载,进而强烈地影响着变形作用的速率和方式。沉积盆地作为造山带物源区卸载物质的直接堆积场所,物源区的构造和剥蚀演化过程对盆地构造和沉积演化具有重要作用。低温热年代学研究表明,青藏高原新近纪强烈构造活动主要分布在青藏周缘的藏南、西昆仑、阿尔金、藏东及川西等地区,并具有大体同时性,集中表现为大约13—8Ma期间和5Ma以来的两次快速和重大隆升期(Coleman和Hodges,1995;Harrison等,1992;张克信等,2008),这一过程与盆地内快速充填具有很好的耦合关系。

(4)源-汇系统(source-to-sink,简称S2S)研究揭开了盆地沉积充填动力学的新篇章。沉积物从山区剥蚀到河流搬运输送到汇水盆地(湖泊或海洋)经历了一个复杂过程,地表受到侵蚀的沉积物和溶解物质通过一系列相互连接的地貌环境单元,沉积或沉淀在洪积平原、海洋大陆架或深海平原上,这套相互连接的环境单元就构成了源-汇系统。源-汇系统分析就是分析从剥蚀区到沉积区各种外来的和内在的控制沉积物分散的各种因素共同作用导致的这套相互连接的环境单元的动力学过程及其响应机制。源-汇系统是地球系统科学中复杂的组成部分之一。大量的研究证明,源-汇系统分析必需综合考虑沉积物从物源区到沉积区的整个过程,并且与构造和气候等因素紧密联系起来,这样一个过程被定义为沉积物路径系统(sediment routing system)或沉积物路径过程(sediment routing processes)(Cowie等,2008;Montgomery和Stolar,2006;Whittaker等,2007)。早期沉积盆地源-汇系统研究中,往往过于强调对盆地现今构造格架和沉积物的研究,而忽视盆地物源区风化剥蚀过程、沉积物搬运和分配,导致在盆地沉积充填模拟中出现许多不确定性。源-汇系统认为盆地分析不仅需研究物源区和沉积区两个单元,而且还需要强调在地球表层沉积从物源区剥蚀、通过河流等搬运并在盆地沉积三个相互紧密联系的次级过程的研究。因此,一个典型的源-汇系统包括三个次级系统,即剥蚀区域、搬运区域和沉积区域。源-汇系统研究构成了沉积学领域一个新的方向(汪品先,2009),也是美国“MARGINS Program Science Plans 2004”(洋陆边缘科学计划2004)所确定的四个主要研究领域之一(高抒,2005)。该计划提出源-汇系统研究任务包括沉积物和溶解质从源到汇的产出、转换和堆积,物质侵蚀、转换过程的反馈机制,全球变化历史记录和地层层序形成。同样,在欧盟第五框架协议的资助下,欧洲9个国家20多个实验室和研究机构结合InterMARGINS和IODP发起了EUROSTRATAFORM计划。该计划的目的是了解从源到汇的沉积系统,理解和模拟地中海和北大西洋边缘由河流经浅海陆架和峡谷到深海的无机和有机颗粒搬运过程,确定沉积物搬运过程、通道和通量的时空变化特征及其对沉积地层形成的作用和贡献。

(5)大陆边缘盆地动力学成为地球动力学热点。大陆边缘是洋陆两大巨型地质、地貌单元的过渡地带以及地球物质循环交换的主要地区。大陆边缘板块活动剧烈,岩石圈变形强烈,地震活动频繁,汇集了全球90%的沉积物,蕴含了丰富的海洋矿产资源。大陆边缘不仅受到学术界的高度重视,也受到各国政府和产业部门的高度关注。近年来,国际大陆边缘计划(InterMARGINS)和综合大洋钻探计划(IODP)将大陆边缘盆地动力学作为重点研究方向,许多国家和区域组织相继建立了自己的大陆边缘大型科学计划,如欧洲大陆边缘计划(EUOMARGINS)、美国大陆边缘计划(MARGINS)、英国的大陆边缘3D研究、挪威大陆边缘研究网络计划以及澳大利亚大陆边缘计划等。

(6)盆地流体研究成果丰硕。盆地流体活动作为控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素,对层控矿床、油气聚集起到了关键性控制作用,一直是国内外地质学家关注的重点。近年来,盆地流体研究在地质流体的大规模运动与造山带演化的耦合关系、金属-烃类-水-岩石的相互作用(metal-hydrocarbon-water-rock interaction, MHWR)(Giuliani等,2000;Lee等,2000;Gustkiew等,2001;Hulen等,2001)、断裂带流体压力与断裂破裂过程的耦合机制(Cox,1995;Robert等,1995)、超压体系内流体活动规律(Anderson,1996;Xie等,1997,2003)、含油气系统中流体输导网络、盆地流体的四维勘探技术等方面均取得了丰硕的成果。

三、沉积盆地分析内容及其研究意义

(一)沉积盆地分析内容

沉积盆地分析的内容就是分析盆地形成及演化过程中的规律性,由此再造盆地的发展史,对其中的各种沉积矿产资源做出合理的预测和评价,其最终的目的是为能源资源及其他沉积和层控矿产的勘探和开发服务。近年来人们对矿产资源的需求量增大和矿床勘查的难度增大,促进了盆地分析中多学科和多种手段的结合,沉积学、大地构造学、地球物理学、地球化学和矿床学等许多学科的进展及其与盆地分析互相渗透,使得盆地分析领域得到突飞猛进的发展。正是源于多学科联合研究和新技术的使用,促使盆地分析领域逐渐拓宽,当今盆地分析进入盆地动力学研究阶段。沉积盆地动力学可以理解为盆地内充填物(包括沉积充填和地层流体)形成过程、演化机制及其控制因素分析,既包括盆地沉积充填、盆地流体形成演化及其控制机制分析,也包括直接控制和明显影响盆地沉积充填和盆地流体的地球内、外动力地质作用及其动力学机制分析。盆地动力学研究内容包括3部分,即以沉积学分析为主的盆地沉积充填动力学、以构造作用分析为主的盆地形成演化动力学和多学科交叉的盆地流体动力学研究。

1. 盆地沉积充填动力学

盆地沉积充填分析就是研究盆地内充填沉积物的内部构成、空间展布及其演变规律。一般而言,盆地充填物分析包括两方面内容:一方面是充填物的成因及其沉积作用过程分析,也就是沉积体系分析的主要内容;另一方面充填物的地层属性分析,强调充填物序列、地层格架及沉积体的空间配置,也就是层序地层分析的主要内容。近年来,层序地层学及精确定年技术提出了建立等时地层格架、确定盆地中沉积体系三维配置的理论与方法,大大推动了沉积充填动力学的研究。构造-地层学、事件地层学、层序地层学和地震沉积学等相关分支学科的密切结合,更好地揭示了各类构造背景下发育的盆地构造格架和层序地层格架,更好地揭示了构造、海平面变化和沉积物补给等各种动力学因素的影响,也为资源勘查和有利储层及矿层预测提供坚实的基础。

2. 盆地形成演化动力学

沉积盆地形成演化分析就是研究沉积盆地形成演化同期和后期变形、反转的动力学机制及其演变过程,包括盆地与板块构造格架和地幔深部过程的动力学关系,盆地发展演化各个阶段的动力学背景、控制因素及其对盆地沉积沉降、能量场等多个方面的影响,盆地后期变形与反转的构造样式及其表现形式。许多沉积盆地的形成演化都是多重机制的联合,在盆地的不同演化阶段其主要控制作用各异,不同的区域地球动力学背景及复杂的板块活动重组事件往往形成复杂的盆地构造样式。

3. 盆地流体动力学

盆地流体是指盆地内任何占据沉积物孔隙、裂隙和在其中流动的流体。沉积盆地作为一个动力学演化的整体,随着盆地形成及不断演化,地层流体形成并随之发生相应的流动,从而构成盆地演化过程中重要的组成部分。盆地流体分析就是试图揭示盆地流体活动以及相关的物理化学作用过程。盆地流体动力学研究可以理解为在沉积盆地范围内,通过对温度场、压力场和化学场等各种物理化学场的综合研究,在流体输导网络的格架下,再现盆地内流体运动过程及其活动规律的多学科综合的研究(解习农等,2006)。地质历史时期沉积盆地的形成和演化经历了一个相当复杂的过程,同样,盆地内流体运动也经历了一个复杂的过程。盆地流体活动是控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素,对各类矿藏的形成、聚集具有关键的控制作用。大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集与盆地及深部的流体作用有关,油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用等有密切关系,因此,盆地流体分析成为油气勘探和某些层控金属矿床勘探研究的重要手段之一。

(二) 沉积盆地研究意义

沉积盆地分析是一项重要的基础地质工作。对沉积盆地的研究不仅具有理论意义,而且具有很大的实际意义。其理论意义表现为:通过对盆地形成演化的分析,可以概括出沉积盆地在时间上和空间上的规律性,这些规律性的揭示和掌握不仅可以深化对盆地的认识,而且为板块构造学和地球动力学研究提供更丰富的依据;其实际意义在于指导能源资源、沉积和层控矿产的寻找、勘探和开发。近30年来,盆地分析已成为能源资源勘探中必不可少的重要方法,并且取得巨大的经济效益。如李四光把沉积盆地作为一定的巨型构造体系的组成部分,研究构造体系对沉积的控制,依此对我国东部的含油气盆地进行了有效的预测;李思田等总结的断陷盆地模式在我国东北部断陷盆地能源普查勘探中取得了明显的经济效益,并展现出广阔的应用前景。

沉积盆地动力学是当今沉积盆地研究领域的主要趋向,其目的在于认识盆地成因,揭示其全部演化历史中的动力学过程。已取得的成就源于资源勘查的驱动,源于多学科联合研究和新技术的使用,同时,应用新理论和新技术重新观察和审视沉积盆地的内部构成将带来资源勘查的更大发展。

1. 地球动力学快速发展大大推动盆地动力学发展

近十多年来,围绕地球动力学的国际重大计划的实施大大深化了盆地动力学的认识,如大陆动力学计划、国际岩石圈计划(ILP)、国际大陆边缘计划(InterMARGINS),还有我国重大研究计划“华北克拉通破坏”、“南海深海过程演变”。这些重大计划的实施,无疑为盆地动力学研究提供了许多相关信息和丰硕成果,特别是深部过程的突破,使得人们能更宏观地从地球动力学角度审视沉积盆地形成与演化的过程。

2. 盆地动力学从定性到定量动力学模拟发展

早期盆地动力学模拟是从盆地的地球物理模型开始的,McKenzie(1978)提出的拉伸盆地纯剪模式定量地探讨了盆地沉降、岩石圈减薄、软流圈上隆以及相应热体制之间的定量动力学关系。随后许多学者进一步提出了拉伸盆地的不同模式。基于地幔对流模型的计算机模拟技术为定量地认识盆地形成演化过程提供了可能性,依据正反演对比和约束的有限元数值模拟技术可以再现盆地形成与演化过程。此外,针对盆地有关参数的定量动力学模拟也取得了巨大的进展,早期的一维模拟针对沉降史、热历史、有机质成熟的排烃研究已在石油界成功地普及,目前的三维模拟系统则重点解决流体的运动和油气运移,由于其难度高,尚处于探索过程。

3. 高精度地球物理技术和方法不断更新

高精度的地球三维成像技术、地震层析成像技术等一系列研究地球内部的地球物理技术不断创新,使得整个地球的内部结构影像分析精确度日益提高。近年利用天然地震和地球环境噪声进行的表面波成像技术为从地表到地幔岩石圈的速度结构以及深部动力学参数反演提供可能。遥感、GIS、GPS等研究地球表层的技术也不断应用于地表形变分析。在盆地分析和油气勘探领域,许多高精度的地球物理技术提供了盆地整体结构的细节,成为研究盆地地层格架和构造格架最必要的基础。近代在油气勘探中最具重要意义的是三维地震及其配套技术,如三维可视化等。目前,三维地震技术已成为正确识别圈闭和储集体的最有力工具。

4. 国民经济对能源需求的快速增长将带动对盆地动力学更深入的理论研究和总结

目前我国油气资源在供求关系方面正面临严峻形势。在寻求多种渠道解决国民经济对能源需求快速增长的同时,最关键和最根本的问题仍然是找寻大型油气田和开拓页岩气、煤层气等新的油气勘探领域。找寻大油气田最关键的是在盆地中识别富生烃凹陷及其所控制的油气系统,没有富生烃凹陷就没有大油气田赖以形成的首要基础,而富生烃凹陷及大型油气系统的形成又有其特有的盆地动力学背景。数十年勘探历程的经验,使人们意识到只有开拓新领域才能找到更多的对可持续发展起支柱作用的大型油气田。显然,盆地动力学对能源资源分布研究具有广阔的应用前景,需要运用当代盆地动力学和油