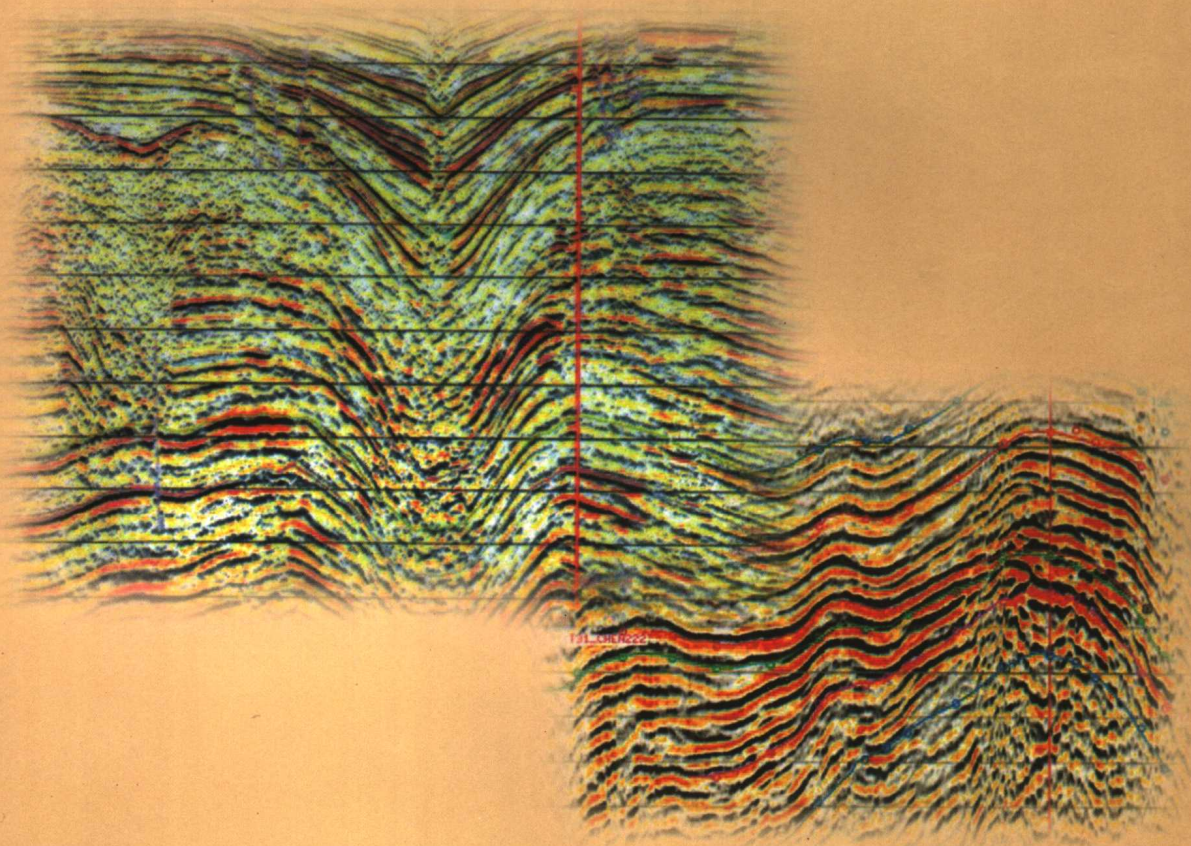


联合资助 国家自然科学基金项目
教育部重点基金项目
中国地质大学211项目
中国地质大学出版基金

异常压力盆地流体动力学

Basin Fluid Dynamics in Abnormally
Pressured Environments

解习农 李思田 刘晓峰 著



中国地质大学出版社

国家自然科学基金项目
教育部科学技术研究重点项目
中国地质大学 211 项目
中国地质大学出版社基金

联合资助

异常压力盆地流体动力学

Basin Fluid Dynamics in Abnormally
Pressured Environments

解习农 李恩田 刘晓峰 著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了异常压力环境下盆地流体动力学研究的基本概念、基本理论、基本方法以及在能源资源勘查与预测中的应用。全书分为两部分,第一部分系统介绍沉积盆地流体构成、研究内容、研究现状及主要进展,总结了沉积盆地内异常高压和异常低压形成机制以及相关的研究方法,包括地层压力系统分析、流体输导系统分析、成岩作用分析、流体活动示踪分析和流体流动模拟等。第二部分通过东营凹陷、莺歌海盆地和松辽盆地十屋断陷3个典型实例解剖,阐明异常高压和异常低压环境下盆地流体活动特点,讨论了不同压力环境下油气运移、聚集规律以及相应的油气成藏模式。

本书可供有关高等院校资源勘查工程、沉积学和油气地质学领域的教师、博士和硕士研究生,科研机构相关领域的研究人员,石油企业的广大石油地质工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

异常压力盆地流体动力学/解习农,李思田,刘晓峰著. —武汉:中国地质大学出版社, 2006. 5

ISBN 7-5625-2093-3

I. 异…

II. ①解…②李…③刘…

III. 构造盆地-流体力学-研究

IV. P618.130.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 023859 号

异常压力盆地流体动力学

解习农 李思田 刘晓峰 著

责任编辑:张晓红 刘桂涛

责任校对:戴 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:346 千字 印张:13.5

版次:2006 年 5 月第 1 版

印次:2006 年 5 月第 1 次印刷

印刷:中国地质大学印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 7-5625-2093-3/P·662

定价:48.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

沉积盆地包括沉积骨架和孔隙流体两部分。多年来人们普遍侧重于沉积盆地的骨架特征分析,而对岩石骨架孔隙中的流体研究较少。近年来人们已广泛认识到盆地热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,沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用等有着密切关系,大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集亦与盆地内及地壳深部的流体作用有关。因此,盆地流体研究不仅构成盆地动力学分析的重要组成部分,而且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。

盆地流体研究构成了近年来新兴研究方向,并成为当今国际地学界的热点问题。盆地流体分析既是多学科交叉的研究领域,又是盆地动力学研究中一项重要的基础地质工作。通过盆地流体演化分析,可以概括出盆地流体在时空上的演化规律性,此规律性能为盆地动力学研究提供更丰富的地质信息和理论依据。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。

本书为作者根据近年来所完成的国家攻关课题、国家自然科学基金项目以及教育部科学技术研究重点项目等相关研究成果综合汇编而成。作者根据近十多年来开展的含油气盆地流体分析的理论研究及典型实例的精细解剖,结合国内外该领域的一些重要研究成果,系统地介绍盆地流体分析的基本理论和研究方法,特别是异常压力环境下盆地流体活动特征及示踪分析;同时以东营凹陷、莺歌海盆地、松辽盆地十屋断陷等含油气盆地为例,详细讨论了异常超压和异常低压环境条件下盆地流体活动特征及与之相关的油气运移和聚集规律,为异常压力环境下油气运聚和成藏提供了新的模式。

本书是作者长期研究和实践基础上完成的。其内容丰富,论述深入,编排合理,是第一本关于含油气盆地流体分析的系统而又有特色的专著。该书既全面而又详尽地介绍了盆地流体分析的方法体系,即以压力场、温度场、化学场和流体场分析为基础,以地质、地球物理、地球化学和计算机模拟等多学科的综合研究为技术手段,以盆地流体动力学为核心的盆地流体分析的方法体系,又包含大量盆地流体领域的创新性成果,是盆地动力学方面的重要参考书。该书的出版发行必将对盆地动力学领域的科学发展起到重要的推动和指导作用。

刘增光

2004年7月27日

前 言

流体地质学是当前地学的重大理论前沿。众所周知,流体是地质作用过程中最活跃的因素,它不仅决定了地壳-地幔系统中的物质交换和能量迁移,直接控制和影响地壳乃至地幔的化学、物理作用和动力过程,而且还是形成矿床和油气田的最重要媒介和作用剂。地质流体包括了通过地下岩石流动的所有流体。对于沉积盆地而言,“地质流体”被认为是任何占据沉积物孔隙、裂隙和在其中流动的流体。近年来人们已广泛认识到盆地热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,沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用等有密切关系,大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集亦与盆地中有机流体及深部流体作用有关。因此,盆地流体研究不仅构成盆地动力学分析的重要组成部分,而且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。

沉积盆地包括沉积骨架和孔隙流体两部分。长期以来,人们普遍侧重于沉积盆地骨架岩石的研究,而对岩石孔隙中的流体研究较少。近十多年来随着盆地动力学研究的深入,盆地流体研究越来越受到人们的广泛关注,并成为当今国际地学界的热点问题。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。盆地流体研究就是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领域。近十多年来,由于矿产勘探的深入和多学科的综合研究,盆地流体研究在许多方面取得了突飞猛进的发展。

本书是作者近年来从事盆地流体研究的综合性成果。自1996年以来,先后完成国家“九五”攻关项目专题“莺歌海-琼东南盆地活动热流体及成藏动力学研究”和“莺歌海-琼东南盆地高温超压条件下天然气输导系统研究”、国家自然科学基金项目“盐底辟型盆地流体活动及计算机模拟”(No. 49872045)。近年来,在教育部科学技术研究重点课题“超压盆地热流体活动及油气成藏动力学研究”(No. 01038)、国家自然科学基金青年基金项目“东营凹陷盐-泥构造与超压含盐流体活动的关系研究”(No. 40402014)以及教育部资助跨世纪优秀人才培养计划项目“南海大陆边缘盆地动力学及其油气地质意义”的资助下,又进一步对典型超压盆地流体活动及其油气运移、聚集规律进行了总结。此外,本书中还包括异常低压盆地流体活动及其油气成藏规律的研究成果,这一成果是本书第一作者在香港大学期间与焦赳赳副教授共同完成的。

本书在编写过程中既侧重于盆地流体分析的原理与方法的论述,特别是异常压力环境下盆地流体活动特征分析及示踪方法,又有典型实例的精细解剖,通过盐底辟型盆地(以东营凹陷为例)、泥-流体底辟型盆地(以莺歌海盆地为例)和异常低压盆地(以松辽盆地十屋断陷为例)的精细解剖分析,较为系统地介绍了异常超压和异常低压环境条件下盆地流体活动特征及与之相关的油气运移、聚集规律,同时也介绍了该领域的最新研究方法和成果。

本书由解习农和李思田统稿,其中第二章、第八章由刘晓峰执笔,姜涛参加了第三章部分内容的编写,姜涛、向才富参加了第四章部分内容的编写,杜学斌参加了第七章部分内容的编

写,张成参加了第十章部分内容的编写,其余章节均由解习农执笔。王华、庄新国、陆永潮、任建业、陈红汉、姚光庆、胡祥云、王明君、殷秀兰等参加部分研究工作,同期的博士研究生向才富、孙向阳、姜涛、马丽娟、张成和硕士研究生秦成岗、段九春、肖永韧、杜学斌也参加了部分研究工作。

本书的相关研究工作得到国家自然科学基金委员会、教育部以及中国海洋石油总公司及其所属湛江分公司、研究中心等单位的资助。研究过程中得到刘宝珺院士、汪集旸院士、金庆焕院士、龚再升教授、刘丛强教授等的热情鼓励和真诚帮助,得到了中国海洋石油总公司张国华总地质师、研究中心何汉漪总工程师、杨甲明总工程师、科技部董伟良经理、科技办王伟元主任、湛江分公司朱伟林总经理、谢玉洪副总经理以及王振峰、胡忠良、张敏强、易平、骆宗强、杨计海、朱光辉等专家,胜利油田管理局潘元林总工程师、勘探处孔凡仙处长、物探研究院韩文功院长、于建国副院长等专家从各方面给予的大力支持,在此一并致谢。还要感谢美国加州大学伯克利分校 Wang Chi - Yuen 教授、伊利诺斯大学香槟-厄本分校 Craig Bethke 教授和香港大学地球科学系焦赳赳副教授,感谢他们在相关的研究工作中给予的指导和帮助。可以说,本书是集体劳动和集体智慧的结晶。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请专家和读者批评指正。

目 录

第一部分 异常压力盆地流体分析原理和方法

第一章 盆地流体研究思路和方法	(3)
第一节 盆地流体研究内容和方法	(3)
第二节 盆地流体研究现状及主要进展	(7)
第三节 异常压力盆地流体动力学研究思路	(11)
第二章 异常压力系统基本特征	(14)
第一节 异常压力带划分及基本特征	(14)
第二节 超压体与油气分布关系	(21)
第三章 盆地流体压力系统分析	(24)
第一节 异常高压形成机制	(24)
第二节 异常低压形成机制	(32)
第三节 地层压力研究方法	(33)
第四章 盆地流体输导系统分析	(42)
第一节 盆地流体输导要素及其特征	(42)
第二节 油气运移优势通道分析	(49)
第五章 异常压力环境下成岩作用	(57)
第一节 地层水类型及成因	(57)
第二节 异常高压带成岩作用特征	(63)
第三节 异常低压带成岩作用特征	(69)
第四节 异常压力环境对物理成岩作用影响	(71)
第六章 盆地流体活动示踪分析	(76)
第一节 有机地球化学示踪	(76)
第二节 地层水化学示踪	(81)
第三节 成岩矿物示踪	(83)
第四节 流体包裹体方法示踪	(85)
第五节 地球物理识别方法	(87)

第七章 盆地流体流动模拟	(91)
第一节 盆地流体模拟的原理及方法	(91)
第二节 模拟参数分析及选取	(94)

第二部分 异常压力盆地流体动力学实例研究

第八章 超压盆地流体活动实例——东营凹陷	(107)
第一节 地质背景	(107)
第二节 盆地流体场基本特征	(112)
第三节 异常高压成因机制分析	(124)
第四节 盆地流体活动特征及油气成藏模式	(131)
第九章 泥-流体底辟型盆地流体活动实例——莺歌海盆地	(137)
第一节 地质背景	(137)
第二节 地层压力系统特征	(140)
第三节 盆地流体动力系统特征	(145)
第四节 底辟区热流体活动特点	(147)
第五节 底辟区油气成藏动力学模型	(156)
第十章 异常低压型盆地流体活动实例——松辽盆地十屋断陷	(162)
第一节 地质背景	(162)
第二节 异常低压基本特征	(165)
第三节 异常低压成因机制分析	(169)
第四节 盆地流体活动特征及油气成藏模式	(174)
英文摘要	(179)
参考文献	(193)

Contents

Part I Principles and Methods of Basin Fluid Dynamics in Abnormally Pressured Environments

Chapter 1 Principles and Methods of Basin Fluid Dynamics	(3)
1. Research contents and methods of basin fluid dynamics	(3)
2. Reviews and advance of basin fluid dynamics	(7)
3. Research thought of basin fluid dynamics in abnormally – pressured basin	(11)
Chapter 2 Basic Features of Abnormally Pressured System	(14)
1. Classification and basic features of abnormally pressured system	(14)
2. Relationship between hydrocarbon distribution and abnormally pressured compartments	(21)
Chapter 3 Analysis on Formation Pressured System	(24)
1. Forming mechanisms of overpressurd system	(24)
2. Forming mechanisms of underpressurd system	(32)
3. Research methods of formation pressure	(33)
Chapter 4 Analysis on Basin Fluid Migration System	(42)
1. Basin fluid migration elements and their features	(42)
2. Main pathways of hydrocarbon migration	(49)
Chapter 5 Diagenesis in Abnormally Pressured Environments	(57)
1. Types and origins of formation water	(57)
2. Diagenetic characteristics of overpressured environments	(63)
3. Diagenetic characteristics of underpressured environments	(69)
4. Effects on physical diagenesis in abnormally pressured environments	(71)
Chapter 6 Identifying Evidence for Basin Fluid Flow	(76)
1. Evidence from organic geochemistry	(76)
2. Geochemical evidence from formation water	(81)
3. Evidence from mineral diagenesis	(83)

4. Evidence from fluid inclusions	(85)
5. Evidence from geophysical data	(87)
Chapter 7 Quantitative Modeling of Basin Fluid Flow	(91)
1. Modeling principles and methods of basin fluid flow	(91)
2. Modeling parameters analysis and selectness	(94)
 Part II Case Studies of Hydrocarbon Accumulation Dynamics In Abnormally Pressured Environments 	
Chapter 8 Basin Fluid Flow in an Overpressured System —— Example from the Dongying Depression	(107)
1. Geological background	(107)
2. Background field characteristics of basin fluid flow	(112)
3. Forming mechanisms of overpressured system	(124)
4. Basin fluid flow and hydrocarbon accumulation models	(131)
Chapter 9 Basin Fluid Flow in a Mud—fluid Diapiric Basin —— Example from the Yinggehai Basin	(137)
1. Geological background	(137)
2. Characteristics of overpressured system	(140)
3. Characteristics of basin fluid dynamic system	(145)
4. Hot fluid flow in diapiric area	(147)
5. Hydrocarbon accumulation models in diapiric area	(156)
Chapter 10 Basin Fluid Flow in an underpressured system —— Example from the Shiwu Depression of Songliao Basin	(162)
1. Geological background	(162)
2. Characteristics of underpressured system	(165)
3. Origin of underpressured system	(169)
4. Basin fluid flow and associated hydrocarbon accumulation models	(174)
Abstract	(179)
References	(193)

第一部分

异常压力盆地流体分析原理和方法

盆地流体是指任何占据沉积物孔隙和在其中流动的流体。随着盆地形成和演化,盆地流体产生并且流动。盆地流体动力学是当前油气勘探所关心的焦点问题,也是目前研究的薄弱环节。盆地流体动力学可以理解为在沉积盆地范围内,通过对温度场、压力场和流体场等各种物理、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研究体系。因此,盆地流体分析既是多学科交叉的研究领域,又是盆地动力学研究中一项重要的基础地质工作。近年来,盆地流体研究吸引了广大地质学家的关注和重视。盆地流体动力学构成地质学领域最具生命力的新兴研究方向。

本书第一部分系统地介绍盆地流体分析的基本理论和研究方法,重点突出了异常压力环境下盆地流体分析方法的介绍,包括地层压力系统分析、流体输导系统分析、异常压力环境下成岩作用分析、流体活动示踪分析、盆地流体流动模拟等。

第一章 盆地流体研究思路和方法

沉积盆地包括沉积骨架和孔隙流体两部分。长期以来,人们普遍侧重于沉积盆地骨架岩石的研究,而对岩石孔隙中的流体研究较少。1993年在英国 Torquay 市召开首次国际地质流体会议,“地质流体”(Geofluids)一词被正式使用,随后分别于 1997 年、2000 年、2003 年在英国 Belfast、西班牙 Barcelona、荷兰 Utrecht 召开第二届、第三届、第四届国际地质流体会议,沉积盆地流体的成因、运移和演化成为这几次国际会议的重要议题,《沉积盆地流体的成因、运移和演化》(Parnell, 1994)和《流体流动和水-岩相互作用时限和定年》(Parnell, 1998)等有关专著相继出版。近十年来,随着油气勘探工作的深入,越来越多的证据显示油气运移聚集与超压体系的形成与演化密切相关,因而受到众多石油地质学家们的高度重视,其中仅 AAPG(美国石油地质学家协会)在 1994—2002 年间就出版了 4 部以超压为主题或与超压有关的专著(Ortoleva and Al-Shaieb, 1994; Surdam, 1997; Law *et al.*, 1998; Huffman and Bowers, 2002)。在此期间,我国学者亦开展了大量而卓有成效的研究工作,出版了多部专著(如,焦大庆等, 1998; 马启富等, 2000; 王振峰等, 2003; 郝芳等, 2005),在盆地流体分析、超压体系的分布与成因等方面取得了一系列重要的研究成果。

地质流体包括了地下岩石中流动的所有流体。对于沉积盆地而言,“地质流体”被认为是任何占据沉积物孔隙、裂隙和在其中流动的流体。显然,随着盆地形成和演化,盆地流体产生并且流动。大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集亦与盆地及深部的流体作用有关。盆地流体研究不仅构成盆地动力学分析的重要组成部分,而且盆地流体的流动与成矿、油气成藏密切相关。近年来人们已广泛认识到沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用等有密切关系,盆地热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。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。

盆地流体研究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领域。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,盆地内流体的运动也经历了一个复杂的过程。

第一节 盆地流体研究内容和方法

沉积盆地作为一个动力学演化的整体(Allen, 1990),随着盆地不断演化,地层流体发生流动,它是盆地演化过程中重要的组成部分,尤其是潜在的热和质的传输能力,对各类矿藏的形成、聚集具有关键的控制作用。因此,盆地流体分析(basin fluid analysis, BFA)被认为是沉积盆地分析的重要组成部分,也是油气勘探的重要手段之一(Eadington *et al.*, 1991)。

沉积盆地由连续的多孔隙沉积层所构成,其中孔隙和裂隙空间中各种流体的集合在三维空间和一维时间上构成一个连续的流体场。根据盆地流体场的特点,可将流体场划分为开放

体系和封闭体系。开放体系指有外界流体的介入或流体的输出;封闭体系则指没有外界流体的介入或流体的输出。盆地流体的研究就是分析流体场的演化历程。沉积盆地内流体活动一方面受控于孔隙空间的温度、压力以及化学成分的变化,如温度差引起热对流、压力差形成压力流、化学成分浓度差导致流体浓度扩散,另一方面流体活动又导致盆地内温度、压力和流体化学成分的变化。因此,沉积盆地流体分析也就是盆地内温度场、压力场和流体化学场的耦合分析。盆地流体历史分析也就是盆地温度场、压力场、流体化学场和流体场及其演化特征分析。

一、流体温度场

流体温度场是深部基岩热传递和局部热对流综合作用的结果。流体是热能最直接的载体,温度场在一定程度上反映了流体的流动特征,控制了流体化学组成的变化以及水-岩反应的进程和速率。反过来,我们可以根据局部热异常分析推断流体活动。通过古地温的恢复,在构造演化和区域热流研究的基础上可以判断地质时期的热异常,从而辨别古地下水流动系统(Person, 1995)。

流体温度场包括对现今温度场特征的研究和对古地温场演化史的恢复。沉积盆地内现今温度参数可通过对地层温度的直接测量获得,如钻井直接测试(包括钻井中途测试 DST、重复地层测试 RFT 等)和地表热流值测量。古地温场演化史的恢复主要是依赖于盆地内对温度变化较为敏感的矿物的变质程度或有机质的热成熟作用。目前对于古地温恢复的方法较多,其中公认的可靠程度较高且应用较普遍的是 R_o 法、包裹体法、色标法、磷灰石裂变径迹法等。此外,通过盆地埋藏历史(包括沉降、沉积和抬升作用)分析或计算机正反演模拟计算,亦可以恢复古温度场。

二、流体压力场

流体压力场是盆地内流体运移的主要驱动力,它控制了流体循环样式、运移方向和速率。不同盆地的不同演化阶段往往具有不同的流体压力场和相应的流体循环样式。因此,流体压力场是盆地流体活动的关键。

流体压力场包括对现今压力场特征的研究和对古压力场演化史的恢复。获取现今地层压力参数的方法较多,主要包括:①钻井直接测试,包括 DST、RFT、完井试油资料等,这些测试一般是针对储层进行的;②根据测井曲线计算,目前常用的是根据声波时差曲线和电阻率曲线计算泥岩的地层压力;③根据地震资料计算,常用的方法是根据地震层速度计算相应界面内的地层压力。

相比而言,古压力场的识别是非常困难的,一种较为直接的方法是通过流体包裹体分析,折算出古流体压力;另一种方法是通过计算机正反演模拟计算,在泥岩压实成岩史、干酪根生烃史和超压形成机理及分布研究的基础上,应用泥岩压实和干酪根热降解成烃理论,建立地下流体的连续方程和质量守恒方程来恢复地史时期古压力场的演化史。

三、流体化学场

沉积盆地中现今的流体化学场是随着沉积盆地的演化,原始地层流体经受了多种因素长时间综合作用的结果,因此,流体化学场在平面上和剖面上均存在巨大的差异性。在分析各局部水动力单元内孔隙流体的化学组成、流体来源和成因的基础上,可建立现今流体的化学场,

并可进一步通过研究自生矿物的种类、结晶顺序、水-岩相互作用的反应条件、离子迁移特征、成岩演化序列以及自生矿物同位素组成及其年代学、自生矿物中流体包裹体特征、有机质向烃类的转化过程、油-油岩对比以及有机岩石学研究,以达到恢复流体化学场的目的。

含油气沉积盆地流体化学场在剖面上具有明显的分带性。这是由于在沉积盆地的演化过程中,控制流体化学组成、性质的各种因素随着埋深的增加发生阶段性的变化,如粘土矿物的脱水作用、泥岩压实排水作用和有机质的成烃作用都具有明显的阶段性。流体化学场在平面上具有明显的分区性。其原因在于沉积盆地水文体制和局部水文动力单元性质是控制地下流体成因的关键因素。Galloway(1984)曾将沉积盆地水文体制划分为大气水、压实水和温压水(thermobaric water)三种类型,它们具有不同的来源和化学特征。

流体化学场研究涉及范围较广,研究方法较多,主要研究内容及方法包括:成岩自生矿物序列的岩石学研究、同位素组成及地质年代学分析、流体包裹体的测定以及有机质向烃类转化作用研究和有机岩石学研究,这些方法均是恢复地下流体化学场的重要手段(焦大庆等,1998)。

1. 成岩矿物同位素年代学分析

孔隙流体中的物理化学性质决定了自生矿物的种类和自生矿物的同位素组成,反过来,自生序列和自生矿物的同位素组成又能反映孔隙流体的物理化学性质的形成和演化。尤其是国际上20世纪80年代后期逐步发展起来的成岩矿物同位素年代学分析提供了成岩矿物形成的时间,利用自生矿物(主要是伊利石)的同位素年代学分析烃类进入储集层的时间已成功地应用于分析北海油田等地区烃类成藏时间(Lee *et al.*, 1989; Glasmann *et al.*, 1989)。其基本原理是砂岩储层中自生伊利石仅在富钾的水介质环境中形成(Hogg *et al.*, 1993),一旦油气充注,会导致水岩作用停止,伊利石停止生长(Lee *et al.*, 1985)。因此,利用砂岩储层自生伊利石的同位素年龄来判断油气藏的形成时间,根据平面上和剖面上自生伊利石同位素的年龄分布可以判断油气成藏的速度以及烃类运移的方向(王飞宇等, 1995)。

利用成岩作用形成的伊利石(即自生伊利石)的生长年龄判识油气的充注时间,最先是在北海油田开展工作的。在北海油田主要开展K-Ar法定年工作, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年虽然在其他领域已经做了大量工作,但是在成藏期方面的工作才刚刚起步(Wang *et al.*, 2004)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法有着突出的优势:不但样品用量小,一次完成所有测量,测量精度明显提高,而且还可望获得多期的信息。利用自生伊利石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年确定成藏期,存在技术难题:自生伊利石的分离和纯化、区分自生伊利石与碎屑伊利石、有效克服核反冲。Liewig等(1987)认为,通过XRD检测如果没有碎屑矿物(如含K的长石类)的混入,可以不改进分离方法而直接测年;否则就得通过外推方法取得碎屑矿物零含量或改用冷冻-加热循环碎样法以减少碎屑矿物的混入。Chaudhuri等(1999)认为烷基胺阳离子可以优先置换碎屑伊利石中的K和放射性Ar,从而达到对自生伊利石的定年;Dong等(2000)采用激光升温的办法进行自生伊利石的判识。Smith等(1993)提出的“显微包裹”技术可以有效克服 ^{39}Ar 的反冲丢失。因此,在油气的成藏期研究方面, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年可望获得突破。

2. 矿物包裹体研究

近二十年来矿物包裹体研究发展很快,尤其是沉积岩中矿物流体包裹体的研究取得了很大的进展,成为盆地流体追踪研究的有效工具之一。在自生矿物的形成过程中,孔隙流体可以被生长过程中的自生矿物所包裹,这种流体包裹体可以代表自生矿物形成时的原始地下流体

样品。应用现代先进的测试技术,如 U. S. G. S. 气流冷热系统,英国 Linking 自动化程度很高的冷热台系统,能观察微量有机包裹体和进行图像处理的双聚焦激光显微镜,单个包裹体分析的激光拉曼仪,以及包裹体群的 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{13}C$ 同位素和 GC—MS 分析技术等,通过对不同时期不同成岩阶段的流体包裹体的类型、分布特征、均一温度、盐度、化学组成等多种测试,可以全面研究和追踪盆地流体的组成、性质、成因、活动期次及流体的古温压条件(刘德汉,1995),再与连续的成岩自生矿物相结合,就可以恢复孔隙流体化学性质的演化史,追踪其化学组成与变迁。

3. 有机质生烃演化分析

有机质随埋深将发生各种生物的、化学的、物理的反应,并在一定的温度、压力条件下转化为液态和气态的烃类、各种无机气体(如 CO_2 、 H_2S 等)和固态的干酪根。新生流体将影响盆地流体的化学性质和改变各种水-岩反应的方向、速度、产物等。此外,水和矿物等无机组分在有机质成熟过程中亦可充当反应物和催化剂,参与到有机质的生烃转化过程(Seewald,2002)。因此,有机质生烃演化史研究结合成岩序列特征可以追溯孔隙流体的化学组成演化史。

4. 稀有气体同位素分析

研究地下稀有气体同位素组成可以了解地下流体场特征,因为不同流体间的相互作用可以导致不同流体场之间同位素的平衡,从而导致大气成因的稀有气体可转移进入烃类流体中(Ballentine *et al.*,1991)。通过对地层流体中同位素的精确定量分析,可以辨别不同成因的稀有气体,定量分析其分布特征,确定流体注入地层的各种边界条件以及各流体之间的混合程度。

5. 有机岩石学分析

对烃源岩和储集岩中烃类流体残迹的有机岩石学分析可为烃类流体的排出方式、运移相态和途径以及聚集成藏时间的研究提供直接的信息。烃类流体的残迹包括:次生显微组分渗出体或运移沥青、烃类流体包裹体、油滴、油膜、牛顿环、显微组分和矿物沥青基质光性的变化等(王飞宇等,1995)。

四、流体场

流体场的核心是水动力场,地层水作为地下流体的主体,其水文体制、流动样式在很大程度上影响着流体的运移、聚集特征,但在含油气沉积盆地中烃类的生成、运移作用导致的超压的形成,流体组成的改变以及对流体运移通道的属性的影响也是不容忽视的影响因素。Seewald(2003)认为无机沉积组分参与了有机质的生烃转化过程,其中,水作为重要的无机组分,它不仅促进了干燥条件下无法发生的反应得以进行,甚至可能直接为烃类和氧化产物的形成提供了氢和氧。

伴随着沉积盆地的形成演化,盆地流体场常常具有明显的阶段性,可用水文地质旋回来表示。每个旋回的沉积埋藏时期和抬升剥蚀时期均有不同的水文体制和不同的流体流动样式。沉积盆地内最重要的特征之一是渗透性趋于各向异性,以致穿层流动受极低渗透率的制约,而顺层流动则可沿高渗透率通道进行(Deming,1994)。顺层流动中,输导层砂岩的分布控制了流体流动的具体运移路径,因为流体总是沿最小阻力路径流动。穿层流动中,断裂和裂缝对流体的调整具有决定性的作用,它们在一定程度上为不同来源的流体提供了一个复杂的三维通道。因此,流体场研究的关键在于揭示盆地流体的人文体制和流动样式以及流体的输导系统特征。

1. 盆地流体的水文体制和流动样式

盆地流体包括外部流体和内部流体。不同来源的流体具有明显不同的流体场特征。外部流体包括大气水的下渗和深部热流体上侵。大气水的下渗作用分析主要依据恢复古气候-古地貌演化史,结合水化学史,分析大气水的下渗作用规律和影响强度。深部热流体活动分析主要通过深部热流体活动期次以及基底深大断裂来研究其强度和频率以及影响范围。盆地内部流体主要是泥岩压实水和烃类流体,两者在很大程度上决定了沉积盆地流体场的形成和演化。

2. 盆地流体的输导系统

作为流体运移通道的输导体主要有:高孔渗砂体和某些碳酸盐岩、不整合面、断层或裂缝体系。在不同沉积盆地中,流体的输导通道是十分复杂的,它常常是由多种输导要素组合形成复合的输导网络。这种输导网络的复杂性一方面表现在不同输导体三维组合的复杂性,另一方面还表现在输导网络在不同盆地演化阶段的输导能力的可变性。因而输导系统研究实际上是各种流体输导体在空间上组合和在时间上演变的综合性研究。

3. 盆地流体流动特点

在一定的水力梯度下,地下流体在多孔介质中流动的先决条件是输导层具有渗透性,主要控制因素是渗透率和流体性质(相态、饱和度)。沉积盖层中不同岩性地层单元的沉积速度、单层厚度、构造性质以及它们在三维空间上的组合关系控制了输导系统随盆地的发展演化而变化。

第二节 盆地流体研究现状及主要进展

近年来人们已广泛认识到沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用有密切关系,盆地热流体活动可能是控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素。大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集亦与盆地及深部的流体作用有关。中、下地壳及地幔流体与地球深部物质变化、运动规律及其与金属矿床的成矿作用等一直是国内外地学界十分关注的课题,地质流体在深部地质过程中的主导作用受到日益重视。地质流体在地表乃至深部的整个岩石圈的物质变迁和演化过程中都可起到重要的控制作用。为此,国际地学界近年来对地质流体动力学的研究给予了高度重视。美国固体地球科学研究计划已将“盆地中的流体动力学”列入未来数年 and 数十年的优先研究课题。地质流体动力学研究也已列入我国21世纪的重大优先研究领域。近年来,由于矿产勘探的深入和多学科的综合研究,盆地流体研究在许多方面取得了突飞猛进的发展,以下简述其主要研究成果及最新进展。

一、盆地流体流动驱动因素与流动样式

盆地流体流动的基本原则是降低其能量,流体总是从高势区向低势区流动。盆地流体流动样式是盆地动力学研究的重要内容(Dickinson,1997;李思田等,1999)。由于流体流动在地下水资源评价、油气成藏、成矿作用等方面的重要意义,流体流动机制、流动样式和溶质运移等方面研究一直受到各国学者的高度重视。概括起来包括:①盆地流体流动的驱动机制。一般而言,孔隙水在沉积盆地中的流动是由两种因素所致,一是压力驱动,形成压力流;二是热驱动,形成热对流。形成压力流的最重要的驱动力包括:沉积压实、浮力、地形重力和构造应力及