

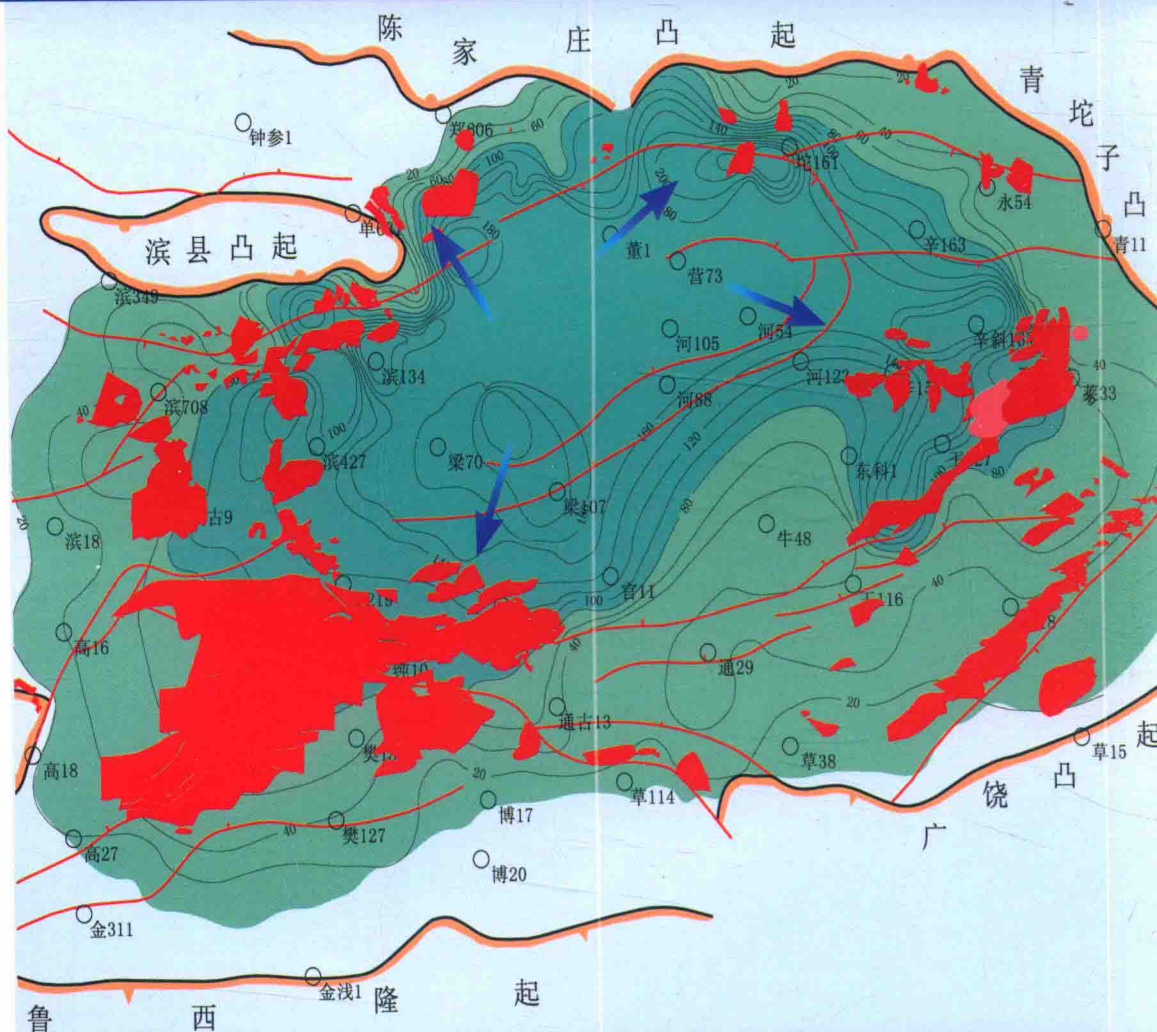


石油高等教育“十三五”规划教材

沉积盆地流体地质学

Geofluids in Sedimentary Basins

■ 主编 曾溅辉





石油高等教育“十三五”规划教材

要 录 内

沉积盆地流体地质学

Geofluids in Sedimentary Basins

曾 斌 辉 主 编



图书在版编目(CIP)数据

沉积盆地流体地质学/曾溅辉主编. —东营:中国石油大学出版社, 2017.4

ISBN 978-7-5636-5534-2

I. ①沉… II. ①曾… III. ①沉积盆地—地下流体—地质学 IV. ①P542.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067937 号

书 名: 沉积盆地流体地质学

主 编: 曾溅辉

责任编辑: 王金丽(电话 0532—86983567)

封面设计: 赵志勇

出版者: 中国石油大学出版社

(地址:山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编:266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: shiyoujiaoyu@126.com

排版者: 青岛汇英栋梁文化传媒有限公司

印刷者: 青岛国彩印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 15.5

字 数: 377 千

版 印 次: 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-5534-2

印 数: 1—1 500 册

定 价: 40.00 元



内容提要

本书全面系统地叙述了沉积盆地流体地质学的基础知识、基本原理和基本方法,介绍了沉积盆地温度和压力特征,沉积盆地流体化学成分及其形成作用,沉积盆地流体动力及其流动特征,沉积盆地流体动力演化及其古流体活动示踪,沉积盆地流体活动与油气藏的形成和分布,沉积盆地流体-岩石相互作用及其对储集层物性的影响,沉积盆地流体与金属矿床的形成和分布。本书内容丰富、概念清楚、图文并茂、可读性强,反映了沉积盆地流体地质学的新进展。

本书可作为高等院校地质资源与地质工程和其他地质学科本科生及研究生的教材,也可供从事油气田勘探和开发、金属矿产勘查和开采工作的生产与科研人员参考。

前言

Preface

沉积盆地作为连接地球内部过程和地表过程的纽带,既是了解和认识地球动力学系统及岩石圈演化的窗口,又是能源和矿产资源富集的重要地质单元。活跃于沉积盆地演化过程中的流体,正是认识这些重大科学问题的关键环节之一。沉积盆地流体研究是地球科学中的前沿领域,为盆地动力学研究中众所瞩目的热点,盆地流体也是油气生、储、运、聚和金属矿床成矿作用的中心科学问题。相对于地层、沉积、构造和热体制等方面的研究,盆地流体是以往研究最为薄弱、难度最大的部分。近20多年来,在国内外跨世纪的地球科学研究规划中,都把流体地质作用列为优先研究领域。同时,国内外很多知名大学的地质学专业均根据本校的学科特点,开设了有关盆地地质流体学方面的课程,编写了一些内部讲义,但至今没有一部比较系统地讲授沉积盆地流体地质学的教材。近年来,作者在为研究生讲授“沉积盆地流体地质学”课程和资源勘探工程专业(油气地质方向)本科生讲授“沉积盆地水文地质学”课程的基础上,组织编写了本教材。

沉积盆地流体地质学是介于石油地质学、水文地质学和沉积学等之间,研究沉积盆地流体的边缘学科。它主要研究沉积盆地流体的成因和性质、流体的流动和演化及其对物质-能量迁移的制约和贡献(包括成矿/成烃效应)。“沉积盆地流体地质学”为油气地质(包括金属矿床勘查)专业本科生和研究生的三大专业基础课程(沉积盆地构造分析、沉积学和沉积盆地流体地质学)之一。

本书由曾溅辉主编,其中倪智勇参与了第9章的编写。在本书的编写过程中,得到了中国石油大学(北京)研究生院、地球科学学院、教务处等领导的关心和支持。本书编写过程中,孟伟、王晨、冯森、李昊天、刘佳、李文航、刘晓凤、王芳芳和毛潇潇等同学为资料收集及整理等付出了辛勤劳动。本书参阅了大量的公开出版的文献、内部资料及网上资料,有些不能一一标注,在此一并表示衷心感谢!

本书为国内外第一部系统论述沉积盆地流体地质学的教材,由于编写难度大,加上编者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请大家提出宝贵意见和建议。

编者

2017年1月

目录

Contents

| | |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| 1.1 沉积盆地流体的定义及其研究意义 | 1 |
| 1.2 沉积盆地流体地质学的研究内容和研究方法 | 2 |
| 1.3 沉积盆地流体地质学的研究现状与发展趋势 | 5 |
| 第 2 章 沉积盆地流体类型和基本特征 | 11 |
| 2.1 基本概念 | 11 |
| 2.2 沉积盆地流体类型 | 13 |
| 2.3 沉积盆地流体基本特征 | 14 |
| 2.4 沉积盆地地下水的赋存特征 | 16 |
| 第 3 章 沉积盆地温度和压力特征 | 22 |
| 3.1 沉积盆地温度特征 | 22 |
| 3.2 沉积盆地流体压力特征 | 35 |
| 3.3 沉积盆地温度和压力耦合特征 | 46 |
| 第 4 章 沉积盆地流体化学成分及其形成作用 | 51 |
| 4.1 沉积盆地水相流体的化学组成 | 51 |
| 4.2 沉积盆地地层水化学成分的形成作用及其控制因素 | 62 |
| 4.3 沉积盆地地层水化学成分分析及图示 | 71 |
| 4.4 沉积盆地石油和天然气的化学组成 | 77 |
| 第 5 章 沉积盆地流体动力及其流动特征 | 80 |
| 5.1 沉积盆地流体流动的基本特征 | 80 |
| 5.2 压实作用驱动下的盆地流体流动及动力学特征 | 83 |
| 5.3 重力作用驱动下的盆地流体流动及动力学特征 | 92 |
| 5.4 构造作用驱动下的盆地流体流动及动力学特征 | 100 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 5.5 | 复合作用驱动下的盆地流体流动及动力学特征 | 104 |
| 5.6 | 沉积盆地局部流体流动及动力学特征 | 107 |
| 第6章 | 沉积盆地流体动力演化及其古流体活动示踪 | 111 |
| 6.1 | 沉积盆地流体动力演化阶段及其特征 | 111 |
| 6.2 | 沉积盆地流体活动历史示踪的基本方法 | 117 |
| 6.3 | 沉积盆地古流体活动的地球化学示踪 | 120 |
| 6.4 | 沉积盆地古流体活动地球物理识别 | 132 |
| 6.5 | 沉积盆地流体动力演化及流动数值模拟 | 133 |
| 第7章 | 沉积盆地流体活动与油气藏的形成和分布 | 142 |
| 7.1 | 地下流体势与地下流体的力场 | 142 |
| 7.2 | 沉积盆地流体与油气运移和聚集 | 152 |
| 第8章 | 沉积盆地流体-岩石相互作用及其对储集层物性的影响 | 171 |
| 8.1 | 沉积盆地流体-岩石相互作用的主要类型 | 172 |
| 8.2 | 沉积盆地流体-岩石相互作用的主控因素 | 175 |
| 8.3 | 沉积盆地流体-岩石相互作用对储集层孔隙形成和演化的影响 | 180 |
| 第9章 | 沉积盆地流体与金属矿床的形成和分布 | 198 |
| 9.1 | 盆地流体与沉积-喷流型矿床的形成和分布 | 198 |
| 9.2 | 盆地流体与密西西比河谷型(MVT)矿床的形成和分布 | 201 |
| 9.3 | 盆地流体与大陆砂页岩型铜、铀以及铅、锌、钒、银、钴等元素的矿床形成和分布 | 203 |
| 9.4 | 盆地流体与沉积岩容矿的微细浸染型金矿床的形成和分布 | 210 |
| 9.5 | 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系 | 212 |
| 参考文献 | | 220 |

1.1 沉积盆地流体的定义及其研究意义

沉积盆地流体(sedimentary basin fluids)是指活动于沉积盆地形成和演化过程中并积极参与了沉积物的各种成岩-后生变化的复杂流体相,包括来自盆地内部沉积物压实和相变所释放出的流体,以及由盆地边缘大陆隆起区补给的下渗大气降水和盆地基底的岩浆或变质热液。

沉积盆地中可能出现以油气为主和以水溶液为主的两大类盆地流体。盆地流体含有丰富的有机组分,具有典型的低温热液地球化学特性。盆地流体温度主要受盆地热演化史和盆地热结构的控制,但以 80~150 °C 为主,最高可达 200~300 °C。盆地流体的盐度变化很大,矿化度大多在 5 000~35 000 mg/L 之间。

沉积盆地作为连接地球内部过程和地表过程的纽带,既是了解和认识地球动力学系统和岩石圈演化的窗口,也是能源和矿产资源富集的重要地质单元。活跃于沉积盆地演化过程中的流体,正是认识这些重大科学问题的关键环节之一。沉积盆地中的油气聚集和某些金属矿床都是盆地演化过程中盆地流体活动的产物,是同一地质构造格架内同一自然过程留下的物质表象。盆地流体既起着传输能量和搬运物质的作用,又是盆地中最活跃的一种地质营力,直接影响和控制着沉积盆地的构造、沉积、成岩和成矿等作用。因此开展沉积盆地流体研究具有重要的理论和实际意义,主要体现在:

(1) 盆地流体研究构成了盆地动力学分析的重要组成部分。

(2) 许多大的构造运动,如地震等均与盆地流体活动有关。

(3) 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,盆地流体的流动与成矿、油气成藏密切相关。例如,大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集均与盆地及深部的流体作用有关。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,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。

沉积盆地流体研究是地球科学中的前沿领域,为盆地动力学研究中众所瞩目的热点,盆地流体也是油气的生、储、运、聚和金属矿床成矿作用的中心科学问题。相对于地层、沉积、构造和热体制等方面的研究,盆地流体是以往研究中最为薄弱、难度最大的部分。近 20 多

年来,在国内外跨世纪的地球科学研究规划中,都把流体地质作用列为最优先或优先的领域,探索的主要课题包括流体的成分及演化过程中的水-岩相互作用、流体的运动学和动力学、驱动系统和输导系统等。流体的压力是流体动力学的中心问题,所以许多学者优先选择有超压异常带的年轻盆地进行研究。美国国家自然科学基金会和 11 家石油公司投资 3 000 万美元,由 Lamout-Doherty 地球科学观测所和康纳尔大学等组成大型联合体,在墨西哥湾盆地设立实验场,研究活动热流体的运动规律和油气运移,已获得许多重要成果(Anderson et al,1993)。这些投入巨大的盆地流体动力学研究,不仅对石油天然气地质学理论突破具有重要意义,也促使金属矿床成矿作用研究出现新的重大进展。通过这些研究已经证实盆地中富烃热流体对许多大型、超大型金属层控矿床的成矿起着主要作用。因此,盆地流体研究正在成为一些有重大意义的新方向的核心内容,如油气成藏动力学和许多类型金属矿床的成矿动力学。

1.2 沉积盆地流体地质学的研究内容和研究方法

1.2.1 研究内容

沉积盆地流体地质学就是通过对沉积盆地温度场、压力场、化学场和流体动力场等各种物理化学场的综合研究,在沉积和构造研究基础上,确定盆地流体的类型、化学组成及其成因和演化特征,结合流体输导网络的地质格架,再现沉积盆地内流体流动过程及其活动规律,探讨沉积盆地流体活动与金属成矿和油气成藏关系的多学科综合研究。

1) 盆地流体温压场

流体温度场研究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。流体压力场研究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。

2) 盆地流体化学场

沉积盆地现今流体主要为地层水、油、气,而古流体则包括自生矿物、脉体、胶结物、流体包裹体和沥青等。沉积盆地流体化学场的研究内容主要包括:

(1) 现今流体(地层水、油、气)的化学组成、分布、成因及演化特征。

(2) 古流体的表现形式、类型及其特征。

(3) 成岩自生矿物序列和胶结物及脉体的岩石学研究、化学成分、同位素组成及地质年代学分析。

(4) 流体包裹体的类型、盐度、温压特征、化学组成及其活动期次。

(5) 有机质向烃类转化作用研究和有机岩石学研究。

3) 盆地流体动力场

流体动力场的核心是地层水动力场,但烃类流体的作用不可忽视。流体动力场研究包括现今流体动力场、古流体动力场和流体流动的输导格架等,其中地下流体古动力场的恢复是流体动力场研究的关键。主要研究内容:

(1) 盆地流体流动的驱动力与运动的基本特征,包括流体流动驱动力、流动样式、流动特征。

(2) 盆地流体输导要素及其特征。

(3) 不同驱动力作用下的盆地流体流动,包括压实作用驱动、重力作用驱动、构造作用驱动以及局部动力驱动下的流体流动样式和流动特征。

(4) 沉积盆地流体动力演化和古流体动力场的恢复,主要有沉积盆地的流体动力演化、古水动力条件研究、古水化学条件研究。

4) 盆地流体活动示踪与模拟

(1) 盆地流体活动地球化学示踪,主要包括有机地球化学示踪、地层水化学示踪、成岩矿物示踪、同位素地球化学示踪、流体包裹体示踪等。

(2) 盆地流体活动地球物理识别,包括海底天然气渗漏和逸散、超压流体活动在地震剖面上的响应。

(3) 盆地流体流动模拟,主要为盆地流体流动模拟的基本原理及方法、模拟参数和选取。

5) 盆地流体与油气成藏和金属成矿

(1) 盆地流体-岩石相互作用与储集层评价。

(2) 盆地尺度下的流体流动与油气成藏,主要包括压实作用驱动下的盆地流体流动与油气成藏、重力作用驱动下的盆地流体流动与油气成藏、构造作用驱动下的盆地流体流动与油气成藏、复合作用驱动下的盆地流体流动与油气成藏以及沉积盆地局部流体流动与油气成藏等。

(3) 储集层和圈闭尺度下的流体流动与油气成藏,主要有地下流体势、地下流体力场、流体流动与储集层和圈闭中的油气运移和聚集。

(4) 盆地流体活动与金属矿床的形成和分布。

1.2.2 研究思路和研究方法

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、流体化学场和流体动力场及其演化特征分析。

沉积盆地流体地质学的研究思路是以沉积充填和构造演化为基础,通过温度场、压力场、化学场及动力场的分析,从盆地流体活动历史角度出发,分析盆地流体场静态和动态过程以及异常压力系统形成与演化、流体流动样式及演化规律,探讨流体活动与油气藏的形成和分布以及金属成矿作用和矿产分布之间的关系,进而指导油气(金属矿床)勘探。

沉积盆地流体地质学的研究方法主要表现在盆地温度场、压力场、流体化学场和流体动力场及其演化特征的研究。

1) 盆地温度场

盆地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)。

盆地温度场研究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镜质体反射率(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。

2) 流体压力场

流体压力差异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集层进行的;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。

3) 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。

现今流体的化学场主要通过水文地质学和水文地球化学的理论和方法,在地层水赋存和分布特征研究基础上,通过对地层水化学成分、同位素组成及其变化的研究,确定孔隙流体的化学组成、流体来源和成因,探讨其变化规律及影响因素,建立现今流体的化学场。

古流体化学场及其演化特征研究主要是在构造、沉积和成岩作用研究基础上,通过对自生矿物、脉体、胶结物、流体包裹体、沥青等地质和地球化学研究,探讨自生矿物等的类型、成分、结晶顺序、水-岩相互作用的反应条件、离子迁移特征、成岩演化序列和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-油和油-岩对比以及有机岩石学研究,以达到恢复流体化学场,确定流体化学场演化的目的。

4) 流体动力场

流体动力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。

伴随着沉积盆地的形成演化,盆地流体动力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。

流体动力场研究涉及现今流体动力场和古流体动力场及其演化特征的研究,主要是在流体温度场、压力场和流体化学场及其演化特征的研究基础上,结合盆地流体输导体系的非均质性,探讨盆地流体的驱动力、流体动力、流动特征、流动样式及其演化特征。

1.3 沉积盆地流体地质学的研究现状与发展趋势

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 Devon 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、2006年、2009年、2012年和2016年分别在英国 Belfast、西班牙 Barcelona、荷兰 Utrecht、加拿大卡尔加里、澳大利亚阿德莱德、法国巴黎和中国武汉召开第二届至第八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届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)等有关专集相继出版。涉及盆地流体的其他会议主要有从1974年开始举办的国际地球化学和宇宙化学学会(IAGC)水-岩相互作用国际会议,每3年1次,目前已召开了14届,其中第12届会议于2007年8月在我国昆明召开;2013年6月在法国召开了第14届会议,其主题主要有:

1) 水-岩相互作用基础

- (1) 热力学和动力学。
- (2) 裂隙和孔隙介质中的运移和输送。
- (3) 矿物表面,水-矿物或玻璃的界面过程。
- (4) 生物地球化学水-岩相互作用。
- (5) 水-气-岩石相互作用。
- (6) 稳定和放射性同位素测定和应用进展。
- (7) 实验和野外调查方法。
- (8) 水在断层行为和变形中的作用。
- (9) 水-矿物或岩石相互作用模拟。
- (10) 光合作用和裂变产物的水化学。

2) 特殊环境(specific environments)

- (1) 水在造岩作用和岩浆过程中的作用。
- (2) 深部流体和地热系统。
- (3) 沉积物和沉积盆地演化中的孔隙流体化学。
- (4) 岩石的风化作用和土壤的形成。
- (5) 包气带和土壤中的相互作用。
- (6) 高盐度的大陆流体。
- (7) 矿床和矿床的形成过程。
- (8) 石油和天然气的生成。

- (9) 火山流体和岩石的相互作用。
- (10) 干旱和半干旱气候下的水-岩相互作用。
- (11) 天体水-岩相互作用。

3) 应用和环境危害

- (1) 水资源和地下水质。
- (2) 地热资源勘探。
- (3) CO₂的地质处置。
- (4) 页岩油气勘探。
- (5) 尾矿床、酸性矿坑水处理和修复。
- (6) 放射性和有毒废物:地质处置和存储,介质的蚀变作用。
- (7) 污染场地的危险评价和修复。
- (8) 浅层和深层污染物的运移和相(fate)。
- (9) 水-岩相互作用和健康。

与此同时,国外许多大学设立了有关地质流体方面的研究机构,开设了有关地质流体方面的课程,并开展了大量的研究工作(表 1.3.1)。

表 1.3.1 国际有关大学的地质流体研究机构、研究方向和开设的课程

| 大学名称 | 有关地质流体方面的研究机构 | 主要研究方向 | 开设的课程 | 备注 |
|-----------------|----------------------|--|---|---|
| 得克萨斯大学 奥斯汀分校 | 地质流体 研究组 | 通过实验、模型和野外观察,研究压力、应力及变形的状态和演化以及流体的运移 | 地壳地质流体 (Crustal Geofluids) | 由康辉、BP、雪佛龙等 13 家能源公司赞助联合成立的研究机构 |
| 美国明尼 苏达大学 | 地质流体 研究组 | 主要研究地下水、岩浆、熔岩、烃类、多相-多组分流体流动特征,并将其应用于水文地质学、火山学、地球物理和地质动力学 | | |
| 比利时鲁汶 大学 | 地质动力和 地质流体 研究组 | 主要研究中、上地壳流体在一些地质动力过程例如成岩作用、低级次变质作用、岩浆作用和变形过程、矿床成因以及烃类的运移和聚集中的作用 | 地质流体与 成矿过程 (Geofluids and Metallogenic Processes) | 由地球化学和天体化学、矿床地质学、地质流体、沉积岩石学、环境地球化学和构造地质学方面的研究人员组成的研究联合体 |
| 英国阿伯丁 大学 | 地质流体 研究组 | 研究地壳流体的成因、演化和运移,主要包括成岩作用、有机物从微生物至甲烷和石墨的演化,与行星科学有关的有机物的演化中流体的作用等 | | |
| 瑞士苏黎世 联邦理工学院 | 地热能 和地质流体 研究组 | 通过计算机模拟、实验研究和野外分析,研究地下多相、多组分反应流体(地下水、烃类、CO ₂ 和岩浆)的动力学过程以及不同尺度下的能量(热、压力)转换 | | |

续表

| 大学名称 | 有关地质流体方面的研究机构 | 主要研究方向 | 开设的课程 | 备注 |
|--------------|---------------|--|-------|---|
| 瑞士日内瓦大学 | 矿产资源和地质流体研究组 | 矿床和地质动力学、岩浆和地壳流体与成矿过程、成矿过程的持续时间、表生过程和环境影响 | | |
| 加拿大里贾纳大学 | 地质流体实验室 | 地质流体的表征和模拟, 主要包括流体包裹体分析和流体流动数值模拟及其在金属矿床和石油系统中的应用 | | 与加拿大地质调查局、Saskatchewan 地质调查局和 Saskatchewan 大学联合 |
| 爱尔兰高威国立大学 | 地质流体研究组 | 主要研究流体包裹体与矿床和油气成藏过程 | | |
| 美国亚利桑那大学 | 地质流体实验室 | 通过野外研究、热液流体实验、实验室测试和理论模拟调查地质系统中流体(水相流体、气体和硅酸盐熔融物)的性质和作用, 研究热液矿床形成环境的流体过程 | | |
| 日本 Tohoku 大学 | 火山学和地质流体研究组 | 主要研究火山和地壳活动过程中的流体活动及其对火山和地震活动的影响 | | |

近 20 多年来, 国际地学界对盆地流体研究给予了高度重视, 出版了大量的专著。美国固体地球科学研究计划已将“盆地中的流体动力学”列入未来数年和数十年的优先研究课题, 盆地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。在此基础上盆地流体动力学取得了一系列研究进展:

1) 盆地流体化学组成和成因及其演化特征

盆地流体主要由水相流体和烃类流体组成, 其中根据成因, 水相流体又可以划分为沉积水(同生水)、大气水、变质流体和幔源流体等。这些流体在埋藏过程中都不同程度地受到流体-岩石相互作用的改造, 导致其化学组分发生了很大的变化, 所以可根据地层水化学特征来重塑地球化学作用过程(Land, 1995; Davisson et al, 1996)。目前, 地层水成因与演化主要是通过对比海水的蒸发曲线来研究的。一般认为地层水中的 Br 是稳定的元素, 因而可用地层水中 Cl、Ca、Mg、Sr、CF(CF=Ca+Mg+Sr-SO₄-HCO₃)与 Br 的相对关系, 来反映这些元素相对蒸发趋势富集或贫乏, 结合岩石学资料, 推测可能的水-岩反应以及地层水的演化特征。而地层水中的稳定元素 Br 和不相容元素 Li、B 的浓度变化可用来判断孔隙水的来源或表征铝硅酸盐矿物的溶解程度。地层水中阳离子、阴离子的研究为表征咸水的成因提供了重要的手段, 可用来评价水-岩作用的程度、解释盆地卤水的流体演化(Bethke, 1996; Banks et al, 2000; Lüders et al, 2005; Gaupp et al, 2008)。地层水中的 Cl 和 Br 是保守组分, 很少受到水-岩作用的影响, 除非存在有岩盐、钾盐等蒸发岩的溶解与沉淀。岩盐溶解而生成的卤水的 $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ 和 $\gamma(\text{Br})/\gamma(\text{Cl})$ 通常显著高于海水。其他阳离子比, 例如 $m(\text{Na})/m(\text{Li})$ 、 $m(\text{Na})/m(\text{K})$ 、 $m(\text{Ca})/m(\text{Mg})$ 也可以反映盆地中古流体和(或)沿古流体运移路径

上古流体与岩石的相互作用的程度(Gaupp et al, 2008)。孔隙水中氢、氧、锶、碳同位素(δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $\delta^{13}C$)也被广泛用于地层水的成因和演化研究(Fisher et al, 1990)。

成岩矿物和胶结物的地球化学信息广泛地应用于研究沉积盆地孔隙流体演化研究。通过对自生矿物以及成岩胶结物的矿物成分、化学成分、同位素组成以及流体包裹体研究能够提供孔隙流体成分和温度信息,探讨其成因和演化特征。

2) 沉积盆地异常压力及超压带流体活动

近 10 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及演化密切相关,因而受到众多石油地质学家的高度重视,其中仅 AAPG(美国石油地质学家协会)在 1994—2002 年间就出版了 4 部以超压流体为主题或与超压流体有关的专著(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(焦大庆等, 1998; 马启富等, 2000; 王振峰等, 2004; 郝芳等, 2005; 解习农等, 2006),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。

大量研究成果表明,在超压体系内盆地流体流动非常缓慢,只有超压体的封闭层破裂时才导致流体的快速流动。Xie 等(2001)通过对莺歌海盆地中央底辟带热流体活动异常进行分析,证实了深部地层中热流体沿垂向断裂向上流动,在 seismic 剖面上形成了模糊带。在东方 1-1 构造,当深部热流体沿断裂流动时,由于上部富泥段的封堵,导致沿断裂带两侧地层温度和压力异常,且越毗邻断裂热异常越明显。

3) 沉积盆地流体流动特征

盆地流体流动特征主要包括流体流动的驱动力、流动样式以及流体流动的影响因素等。盆地流体流动特征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,流体流动特征研究一直受到各国学者的高度重视。

(1) 盆地流体流动的驱动机制。

目前的研究表明,盆地流体的驱动力主要为压实驱动、重力驱动、构造驱动和密度(热对流)驱动四种机制。

压实驱动流体流动是在压实作用下发生的流体流动,流动的实质是压实和成岩过程中自由水或结合水的排出。压实作用是地层水流动的主要动力。重力驱动流体流动亦称地形驱动流动,是以海拔以上地下潜水面为基准面,由流体静压水头驱动的大气水进入沉积盆地的流动,重力是大气水流动的主要动力。构造作用驱动流体流动是在构造应力的作用下,导致盆地流体压力和流体势的变化,从而驱动盆地流体流动(Bethke, 1992; Garven, 1995)。密度驱动流动是由于温度梯度导致的密度差而引起的流动方式,为热对流。热对流虽然仅仅是局部流体流动样式,但它对成岩作用有重要的影响。当流体流动方向与等温线相交时,热对流作用将导致热重新分布、成熟度异常和物质的迁移,而且,热对流也一直被认为是穿过地下岩层溶质运移的机理之一(Wood and Hewett, 1984)。

(2) 盆地流体的流动样式。

在沉积盆地演化过程中,最常见的流体流动样式有:① 压实和超压驱动型;② 重力和地形驱动型;③ 热驱动型;④ 构造应力驱动型;⑤ 地震驱动型。

大量研究成果表明,在不同类型盆地中盆地流体具有不同的流动样式,如构造应力驱动

最常见于前陆盆地,超压体系驱动最常见于裂谷等快速沉降盆地(Garven,1995)。同一盆地不同演化阶段也具有不同的盆地流体流动样式和流动方向,如 Alberta 盆地在不同历史时期可具有完全相反的流体流动方向(Corbet and Bethke,1992)。

盆地流体流动样式可能不是单一的流动样式,而是多个样式复合的流体系统,即包括多个互相关联而又各具特色的流体循环系统。它受盆地地球动力学背景、构造格架、沉积充填、热史及水文体制的共同控制。

(3) 断裂带的流体流动特征。

断层是沉积盆地内最重要的流体输导体之一,近年来,许多学者开展了大量的断裂带结构、断裂输导能力以及断裂带流体流动特征研究。

断裂带具有复杂的内部结构,如断裂碎裂岩和泥岩涂抹层的发育(Knipe et al,1998; Moretti,1998; Aydin,2000)。断裂带的流体运移包括流体沿断裂带的垂向运移和穿过断裂的侧向运移,Knipe 等(1998)曾利用图解法分析断层两盘岩性的对接关系判断其连通性。研究成果表明,断裂的封闭性不仅取决于断层两盘的岩性,而且与断裂带的结构密切相关。在砂岩与砂岩对接时,由于泥岩涂抹层、碎裂岩的存在亦可导致断层封闭(Knipe et al,1998)。

有关断裂的封闭性评价已取得了大量的研究成果,形成了多种评价方法。近 20 多年来,国内外开展了大量的断裂带的幕式流体活动研究。Hooper(1991)认为流体沿断裂运移是个周期流动过程,它与断裂活动期次和性质密切相关。Roberts 和 Nunn(1995,1996)利用数值模拟证实深部流体沿断裂幕式活动可导致断裂两侧明显热异常。

近 10 多年来,许多学者通过对成岩作用(Derome et al,2003; Lorilleux et al,2003; Longstaffe et al,2003; Chi et al,2003)、古水文地质学和层序地层学(Hiatt et al,2003)的综合研究,探讨沉积盆地充填和流体流动之间的关系。

4) 沉积盆地流体-岩石相互作用

(1) 有机-无机相互作用。

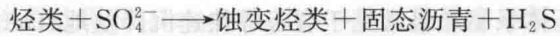
近 20 多年来,大量的学者研究结果表明,在有机酸的参与下,沉积盆地发生了大量的有机-无机相互作用。有机酸可促使矿物溶解,产生次生孔隙。Surdam 等(1984,1989)认为有机酸生成于干酪根未成熟—低成熟阶段。研究还发现,原油热解作用也能生成有机酸(Kharaka et al,1993),但是由于原油中氧元素远低于其母质,所以只有外来氧的介入才能产生较多的有机酸。

墨西哥湾新生界(Land et al,1992)、塔里木盆地(蔡春芳等,1997)在温度高达 135~140 °C 的储集层中仍具有高有机酸浓度。有机酸通过提供 H^+ ,与金属元素螯合,从而大大提高了矿物的溶解度。

(2) 烃类与岩石间的氧化还原反应。

烃类运移到储集层后,可导致烃类发生氧化作用,如褐铁矿被还原而使红色砂岩漂白(Lee et al,1994),并可产生有机酸,使碳酸盐胶结物发生溶解,产生次生孔隙(Surdam et al,1989)。

烃类的硫酸盐还原作用包括热化学硫酸盐还原作用(TSR)、微生物硫酸盐还原作用(BSR)。TSR 作用包括甲烷气、原油、早期形成沥青的硫酸盐还原作用。甲烷气 TSR 作用生成二氧化碳和硫化氢气体;而原油和沥青的 TSR 作用还可导致沥青的形成:



(3) 流体-岩石相互作用对矿物润湿性的影响。

储集层岩石的润湿性控制了流体分布及流动性质,影响地层毛细管压力、相对渗透率及残余油饱和度,因而决定了储集层中原油的采收率。注水采油时,水湿系统的原油采收率比油湿系统高。由于原油采收率的提高意味着巨大的经济效益,因而其成为世界上各大公司竞相开展的研究课题。

5) 盆地流体示踪技术

(1) 有机地球化学方法示踪。岩石中有机质对温度十分敏感,因此可利用有机质的热指标参数进行热流体活动示踪分析,如镜质体反射率和有机质的热解参数(解习农等,1999)。

(2) 无机地球化学方法示踪。新生成岩矿物和黏土矿物转化可示踪热流体活动,比如在中浅部的储集层中由于淡水的渗入可导致长石的高岭石化。黏土矿物转化特别是伊/蒙(伊利石和蒙脱石)混层(I/S混层)的构成和有序性是地史时期古温度的有效标志。

(3) 地层水化学示踪。地层水化学特性可以用于推断不同流体混合程度和流体-岩石相互作用过程(Land et al,1992;Davisson et al,1996)。

(4) 同位素示踪。节理中充填的脉体或胶结物是地质历史过程中,流体-岩石相互作用的产物,通过对脉体或胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 等同位素组成研究,可以追踪古流体的来源,进而探讨古流体的活动特征。

(5) 流体包裹体示踪。流体包裹体是热流体活动的直接证据,它直接记录了热流体活动期次和温度范围,同时还可以利用 CO_2 密度法和 CO_2 摩尔浓度法估算流体压力,由此判断古温压演化。

(6) 地球物理识别方法。热流体活动不仅可以导致温压场变化及地球化学指标异常,而且在各种地球物理资料上均有特殊的响应形式。

6) 盆地流体模拟技术

盆地流体模拟的主要任务是盆地流体流动过程(水动力学)模拟和流体-岩石相互作用过程模拟。

盆地流体数值模拟技术在近10多年来发展极为迅速(石广仁,1994)。20世纪80年代,人们遵循流体流动的达西定律和质量守恒定律编制了一系列盆地流体流动学模拟软件,如1986年美国伊利诺斯大学地质系利用有限差分法编写的二维盆地流体模拟软件——BASIN2。这些模拟软件多数利用数值模拟技术模拟盆地演化过程中沉积物物性、温压场以及流体流动速度、流量等参数随时间的变化。

流体-岩石相互作用过程模拟,早期的工作主要从化学和热力学原理出发,研究不同温压条件下系统中矿物、气体、有机质和水溶液间可能发生的化学反应(Kharaka et al,1988)。模拟方法包括正演模拟和反演模拟。由此来判断孔隙水和溶质变化情况。近年来该领域的研究也逐渐从单一模型向实用型发展,如将流体-岩石相互作用与孔隙度变化相结合(Gouze et al,2002)。

近年来在该领域的研究也逐渐从单一模型向流体动力学过程与流体-岩石相互作用的化学动力学过程结合的系统动力学模型发展。