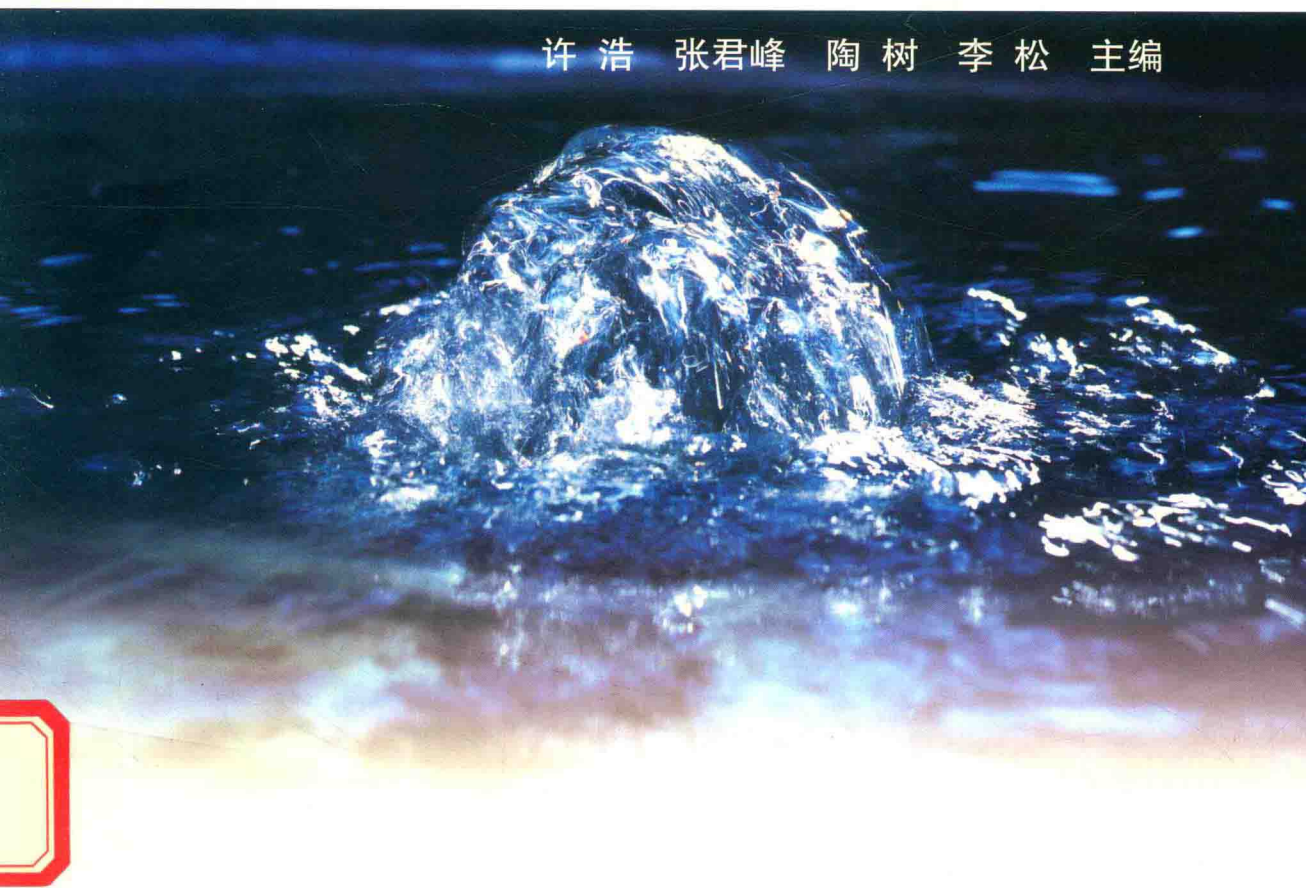


“资源勘查工程（新能源）”国家特色专业建设教材
中国地质大学（北京）教材建设项目资助
中国地质大学（北京）优秀教学团队建设项目资助

非常规 能源流体地质学

FLUID GEOLOGY OF UNCONVENTIONAL
ENERGY RESOURCE

许浩 张君峰 陶树 李松 主编



地质出版社

“资源勘查工程（新能源）”国家特色专业建设教材

中国地质大学（北京）教材建设项目资助

中国地质大学（北京）优秀教学团队建设项目资助

非常规能源流体地质学

许 浩 张君峰 陶 树 李 松 主编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书围绕与非常规油气资源密切相关的流体这一核心,旨在阐明沉积盆地中流体研究的基本理论和基本方法。首先介绍了流体类型和水文地质基础,重点阐述了地下水的形成与起源、赋存状态、分类及补给、排泄与径流;其次,剖析了流体活动的温压场、驱动因素、运聚机制及流体地质作用,详细分析了温度场和压力场的形成机制、流体输导体系构成、非常规油气成藏理论及流体活动效应;然后系统介绍了流体示踪技术;最后对流体模拟分析方法进行了初步介绍。

本书可作为资源勘查工程专业、非常规能源专业及相关专业的教材,也可供石油地质领域的科研与生产单位人员,以及相关专业研究人员、技术人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

非常规能源流体地质学 / 许浩等主编. —北京:
地质出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-116-09852-7

I. ①非… II. ①许… III. ①地质学-教材 IV.
①P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 181185 号

Feichanggui Nengyuan Liuti Dizhixue

责任编辑:肖莹莹 房媛

责任校对:王瑛

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) 66554528(邮购部);(010) 66554571(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554576

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张:9.25

字 数:230千字

版 次:2016年8月北京第1版

印 次:2016年8月北京第1次印刷

定 价:48.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09852-7

(如对本书有意见或建议,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

沉积盆地包括沉积骨架和孔隙流体两部分。由于传统理论和技术条件的影响和限制,早期的盆地研究普遍侧重于岩石骨架,而对于岩石孔隙中的流体关注较少。1993年,在英国托基市召开的首届国际地质流体会议中,“地质流体 (geofluid)”这一概念被正式提出。随后,盆地流体研究逐渐兴起,成为地学研究的重大理论前沿,受到当今国际地学界的广泛关注和重视。

流体地质学是地球科学中的一门新兴的分支学科,其研究核心是流体动力学,即揭示盆地流体活动以及相关的物理化学作用过程。具体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。

油气资源 (包括常规油气资源和非常规油气资源) 是沉积盆地中流体的重要组成部分,随着沉积盆地的演化,流体产生并流动,它自身的活动和演化构成了盆地动力学演化的重要内容,而且盆地流体广泛参与了沉积物的成岩、后生、成烃和成矿过程。因此,了解盆地成藏、成矿过程中流体的类型,弄清各种流体的基本性质和特征是有效进行油气勘探开发的重要环节和基础。编写一本既能够反映目前国内外流体地质学科新进展,又能对我国新时期非常规油气勘探开发具有实际指导意义的《非常规能源流体地质学》教材,意义十分重大。

本教材围绕沉积盆地中与非常规油气资源密切相关的流体这一核心,分为八章。第一章为绪论,主要介绍流体类型及其作用、流体地质学研究现状及主要进展和课程的要求;第二章为水文地质基础,地下水的形成与起源、赋存状态、分类及补给、排泄与径流;第三章为流体温度场与压力场,详细阐述了温度场的热源及形成机制、温度场的表征及影响因素、压力的概念与分类及异常压力的形成机制;第四章为流体驱动因素与运聚机制,探讨了流体驱动因素与流动样式、流体输导体系及聚集机制与过程;第五章为非常规油气成藏理论,主要介绍了非常规油气概念、类型及非常规油气聚集规律;第六章为流体地质作用,介绍了流体活动效应与流体地质作用类型、流体-岩

石作用、热液作用；第七章为流体示踪技术，主要介绍了流体包裹体示踪、地层水化学示踪、有机地球化学示踪及其他示踪技术；第八章为盆地流体模拟，系统介绍了流体流动模拟、温压场模拟、生烃史模拟及流体势分析方法。

其中，第一章、第二章、第六章、第八章由许浩编写，第三章、第四章由张君峰编写，第七章由陶树编写，第五章由李松编写。全书由许浩负责统一修改和定稿。

本书在编写过程中得到了中国地质大学（北京）教务处、能源学院和能源与环境教研室领导和同事们的关心和支持；参考和引用了大量文献，在此谨向有关研究单位和文献作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限，本书内容选择和编写深度方面难免有不当之处，敬请广大同仁和读者指正。

编 者

2016 年 3 月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 流体类型及其作用	1
一、盆地流体类型及特征	1
二、流体地质作用	2
第二节 流体地质学主要研究进展	2
一、盆地流体驱动机制与流动样式	2
二、异常压力的形成机制	3
三、盆地流体流动输导体系	3
四、非常规油气聚集理论	4
五、盆地流体与岩石相互作用	5
六、盆地流体示踪技术	6
七、盆地流体模拟技术	7
第三节 非常规能源流体地质学课程内容及要求	8
第二章 水文地质基础	10
第一节 地下水形成与起源	10
一、沉积成因水	10
二、渗入成因水	10
三、凝结成因水	11
四、深成水	11
第二节 地下水赋存状态	12
一、气态水	12
二、结合水	13
三、液态水	14
四、固态水	15
第三节 地下水分类	15
一、含水层、隔水层和弱透水层	16
二、潜水	17
三、承压水	17
四、上层滞水	19
第四节 地下水补给、排泄与径流	20
一、地下水的补给	20
二、地下水的排泄	22

三、地下水的径流	24
第三章 流体温度场与压力场	26
第一节 温度场热源及形成机制	26
一、盆地内的热源	26
二、温度场的形成机制	27
第二节 温度场表征及影响因素	28
一、温度场的特征参数	28
二、温度场的影响因素	30
三、中国现今温度场特征	32
第三节 压力概念与分类	33
一、压力基本概念	33
二、地层压力划分	33
三、异常压力分布特征	34
第四节 异常压力形成机制	35
一、异常高压成因	35
二、异常低压成因	38
第四章 流体驱动因素与运聚机制	41
第一节 流体驱动因素与流动样式	41
一、流体的驱动因素	41
二、流体的流动样式	42
第二节 流体输导体系	44
一、流体输导通道类型	44
二、输导体系及优势运移通道	52
三、优势运移通道	54
第三节 流体聚集机制与过程	54
一、油气聚集的动力学机制	54
二、油气聚集的过程	56
第五章 非常规油气成藏理论	59
第一节 非常规油气概念与类型	59
一、非常规油气基本概念	59
二、非常规油气主要类型及分类	59
第二节 非常规油气聚集	64
一、非常规油气聚集特征	64
二、非常规油气运聚机制	67
第六章 流体地质作用	72
第一节 流体活动效应与流体地质作用类型	72
一、流体活动效应	72
二、流体地质作用类型	73
第二节 流体-岩石作用	75
一、陆相湖盆流-岩反应的成岩系列	75

二、次生孔隙成因与成岩流体	76
三、无机成因的二氧化碳酸性水的溶解作用	79
第三节 热液作用	79
一、热液成因	79
二、热液对碳酸盐岩作用	80
三、热液对碎屑岩作用	81
四、热液对煤层作用	82
第七章 流体示踪技术	84
第一节 流体包裹体示踪	84
一、流体包裹体的形成	84
二、油气包裹体的分类	85
三、流体包裹体研究的基本前提	88
四、流体包裹体分析方法	89
第二节 地层水化学示踪	92
一、地层水化学成分	93
二、地层水中的同位素	94
第三节 有机地球化学示踪	95
一、有机地球化学参数示踪石油初次运移	95
二、有机地球化学参数示踪油气二次运移	97
三、利用有机地球化学参数研究油气的聚集	102
第四节 其他示踪技术	102
一、成岩矿物示踪	102
二、地球物理示踪技术	103
第八章 盆地流体模拟	106
第一节 流体流动模拟	106
一、基本原理	106
二、基本模型和方法	108
第二节 温压场模拟	109
一、地层压力模拟	109
二、盆地热史恢复	110
第三节 生烃史模拟	112
一、化学动力法	112
二、热解模拟法	113
第四节 流体势模拟	115
一、流体势相关概念	115
二、测势面	116
三、地下流体的力场	118
四、UVZ 法则与油气运聚	121
参考文献	127

第一章 绪 论

地质流体指通过地下岩石中的所有流体，包括各种液体、气体、超临界体、熔体等。对于沉积盆地而言，盆地流体主要是指占据和通过盆地沉积岩石孔隙空间的所有流体。近年来，人们逐渐认识到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，非常规油气资源的生成、运移、成藏和成矿过程与盆地流体活动有着密切关系。本章将介绍流体类型及其作用、流体地质学主要研究进展及本课程内容及要求。

第一节 流体类型及其作用

一、盆地流体类型及特征

根据不同的分类标准，盆地流体具有不同的划分方案。依据流体的来源和成因特征，盆地流体划分为表生渗入流体、自生流体和深部流体。

（一）表生渗入流体

表生渗入流体是指由盆地边缘隆起区（蚀源区）补给的流体，其来源包括大气降水、江河湖泊和海洋。它主要是通过垂直的渗透，或者是通过断层、裂隙以及出露于地表的渗透性地层、不整合面、各种侵入体等进入盆地内部，流体成分主要受所在地区环境控制。盆地表生渗入流体的温度较低，其形成初期常常是富氧的，矿化度较低。

（二）自生流体

自生流体是指来自盆地内部的各种流体，主要源于沉积盆地中的沉积物。随着沉积作用的进行，地层埋深不断增加，盆地中的物理化学条件发生变化，沉积物由此发生改变而新产生的流体。此类流体包括沉积物间隙水、沉积物颗粒吸附水、黏土矿物的层间水和结构水，以及由沉积有机物热解而成的各种气态/液态烃类有机流体（石油、天然气）等。盆地自生流体的温度较高，矿化度较高。以水为主的无机流体的成分取决于原生沉积物的地球化学性质，以烃类为主的有机流体的成分取决于机质的丰度、类型和成熟度。

（三）深部流体

深部流体是指沿盆地基底断裂上升的深部流体，包括岩浆热液、火山热液、变质热液、地幔深部流体及受热的地下水循环热液等，其最大的特点是富含挥发分和各种成矿金属元素等组分，流体温度较高。

上述3种流体，在盆地中广泛分布。表生渗入流体在整个盆地中均有分布，主要存在浅层中（0~2000m）。随着埋深加大（2000~5000m），地层压实程度增加，温度、压力增

高, 封闭条件变化, 沉积物转化出的自源流体或新生流体大量生成, 表生渗入流体混合。在 5000m 以下的深度, 则以各种高温高压的岩浆热液、地质热流体和变质流体为主。

二、流体地质作用

流体活动是控制成岩、成矿作用的主要因素。在流体与岩石不断发生反应的过程中可以溶解、搬运、沉淀、交代各种物质, 还可导致岩石中各种挥发分的凝结和释放, 致使岩石的成分、组构和性质不断发生各种成岩变化。因此, 地壳中的热流体活动不仅是物质交换、能量传输的成岩作用, 也是某些无机和有机元素富集成矿的过程。流体活动是地壳运动的一种主要动力, 从板块构造到沉积盆地内各种局部构造都与流体的活动有关。此外, 地质流体活动直接影响着人类的生存环境, 大量证据说明, 流体对火山、地震和滑坡的触发起到至关重要的作用。非常规油气资源作为沉积盆地中流体的重要组成部分, 在其形成、演化、富集、成藏乃至产生的整个过程中均发生着不同形式的流体地质作用, 因此, 流体地质理论及研究方法是常规油气资源的勘探开发必备的基础。

第二节 流体地质学主要研究进展

随着勘探的深入和多学科的综合交叉, 盆地流体研究在盆地流体流动样式、流体输导网络、非常规油气聚集理论、流体与岩石相互作用、流体示踪技术、流体模拟技术等方面取得了长足的进展, 以下简述其中主要研究成果。

一、盆地流体驱动机制与流动样式

流体流动在地下水资源评价、油气成藏、成矿作用等方面具有重要意义, 流体流动机制和流动样式方面研究一直受到各国学者的高度重视。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。Hubbert (1953) 提出了流体势的概念。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地震作用。其中, 压实驱动、地形驱动和构造应力驱动是沉积盆地内的主要流体流动的驱动机制。构造应力场对流体压力场有重要的改造作用, 进而对油气成藏起着重要影响。油气的运移和聚集是各种动力作用的耦合, 这些作用力充分体现在流体势这一概念上, 天然气在地层中的运移是流体压力、重力、毛细管力及构造应力等多种动力耦合作用的结果, 在构造强烈活动时期, 由于强烈构造挤压引起流体压力骤增对天然气运移的作用远远大于重力和毛细管力的作用, 故构造应力起主导作用 (宋岩等, 2001)。康永尚等 (1998) 提出了油气成藏流体动力系统的概念, 并提出重力驱动型、压实驱动型、流体封存型及滞留型油气成藏流体动力系统类型的划分方案, 为分析油气的运聚提供了一种思路。一些学者提出成藏动力学的概念, 将流体动力的研究与其他地质条件和作用过程综合起来研究油气运移过程和聚集规律 (龚再升等, 1999; 郝芳等, 2004; 罗晓容, 2008)。热对流虽然只是局部流体流动样式, 但它对岩石的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、成熟异常和物质的迁移 (Wood et al., 1982)。盆地流体流动样式是盆地动力学研究的重要内容 (李思田等, 1999)。不同

类型盆地中盆地流体具有不同的循环样式,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深沉降盆地(Garven, 1995),此外,同一盆地不同演化阶段也具有不同的流体循环样式和流动方向,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 et al., 1992)。

二、异常压力的形成机制

异常压力形成机制始终是油气运移和成藏理论的核心内容之一,随着油气勘探开发的不断深入,国内外很多盆地中都发现了不同压力类型油气藏赋存在不同的构造位置或者不同的层系。对于含油气盆地中高压的发育机理、高压流体的流动样式及其成岩、成烃和成藏效应已进行了广泛研究。归纳起来,高压形成的基本机制有以下3点:①由于外部应力的作用导致地层孔隙空间的减小;②由于热力/成岩作用导致地层中流体密度的改变;③由于流体运动导致密度、水头变化形成的异常地层压力。除上述3类增压机制外,有效的封闭条件也是制约异常压力形成、发展的关键因素。引起上述3种机制的地质作用有:沉积物的欠压实作用、构造应力、水热增压、黏土矿物脱水、烃类物质生成等。在盆地发展的不同阶段,不尽相同的机制会导致地层压力的变化;不同性质的岩石中,各种增压机制的作用效果也各有不同。郝芳等(2005)认为沉积盆地中的异常高压可分为静态和动态两种。静态型要求发育理想的封闭层且内部单元化程度(分割性)明显,异常高压可以在形成后长期得到保存;动态型则缺乏理想的封闭层,异常高压是由于深部高压流体不断充注维持的。通过对世界范围内低压现象的分析,Corbet(1992)认为异常低压主要发育在一些致密气层砂岩和发生较强烈剥蚀的盆地。总结国内外相关研究成果,被广泛认可的低压成因机制主要包括4个方面:①岩石孔隙空间增大:抬升—剥蚀反弹、过压实作用;②孔隙流体体积减小:温度降低、轻烃扩散、断裂和不整合面的压力释放作用、耗水作用、渗透作用、油气开采、地下水流动;③流体承压高度降低:承压面低于地表;④原始压力的保存:构造或岩性封闭作用。

三、盆地流体流动输导体系

在含油气盆地中,油气从生成、排出、运移、聚集和破坏调整的全过程中,输导体系始终起着重要的纽带和桥梁作用。这不仅是石油地质学理论研究的重要课题,而且是油气的勘探开发中必须要重点解决的实际问题,如果忽略了输导体系的作用将会导致钻探失利,增加勘探的风险。在含油气盆地中,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。

许多学者针对不同含油气盆地的实际地质情况已进行了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果,但归纳起来主要体现在地质分析、物理模拟和数值模拟三个方面。由于高精度层序地层学、地震岩性预测和层序地层模拟技术的综合应用,对于砂岩型输导体空间分布的预测能力已明显提高。随着大量低位域砂体型岩性油气藏的发现,对不整合界面或层序界面以及与其相邻的高位和低位体系域砂体内流体行为的研究也取得了长足的进展。在断裂输导机制方面主要有两种认识:一是以浮力为主要动力和遵循达西定律的缓慢渗透机制,主要输导通道是断层核及其两侧诱导裂缝网络。二是“地震泵”作用下“幕式”流动机制。Hooper(1991)通过多种方法证实断裂和流体的活动具有幕式(非稳态)的特

征,受区域构造运动的影响,盆地内断裂发生多期活动,断裂多次开启和闭合,含烃流体(具异常高孔隙流体压力)沿断裂带发生多次幕式运动。Hindle (1997) 研究认为,断层面的几何形状和产状对油气运移路径有着重要的影响,分为3种情况:①平面断层单元不改变流线方向,路径从入口点开始保持不变;②凹面断层使运移路径呈发散趋势;③凸面断层使运移流线汇集而形成油气垂向运移的优势通道。物理模拟是在实验室条件下,对地下油气在成藏期的运移和聚集过程进行还原和再现,通过设定不同的实验条件(温度、压力、岩性及孔渗等),对影响油气运聚的条件进行分析。曾溅辉等(2002)通过多组断裂输导的物理模拟实验表明:①断层带渗透率对油气运移路径有重要影响;②幕式充注时,在异常高压作用下,油的运移方式具放射状、毯式运移特征;③幕式充注时,在异常高压作用下,油首先很快充注断层带下部储层,而后才充注上部储层。孙永河等(2007)通过实验室物理模拟表明,“地震泵”抽吸作用下天然气运移速率快、效率高,在短时间内可以大规模运聚成藏。姜素华等(2005)模拟了断层面形态对石油运移的影响,结果表明,在幕式充注条件下,S形断层面最有利于断层两盘油的充注,并且运移速率较大;凹形断层面有利于断层下盘充注,凸形断层面有利于断层上盘油的充注。在数值模拟方面,Hindle (1997)对巴黎盆地和威里斯顿盆地进行了油气运移数值模拟,计算了油势等值线,并通过记录经过每个砂岩输导层单元的流量绘制了油气运移的路径图。并强调运移通道的形态和位置在很大程度上受构造形态控制。吴冲龙等(2000)将传统动力学模拟与人工神经网络模拟结合起来,提出人工神经网络模拟油气二次运移的技术,并以这一思想为指导编制出了功能非常强大的盆地模拟系统。储层的精细描述和储层中可动油的研究推动了流体输导的三维和四维模拟(Burley et al., 2000; Schneider et al., 2000),研究成果为确定储层中剩余油的分布提供有效的技术和方法。

四、非常规油气聚集理论

随着世界油气地质理论的发展与勘探开发技术进步,非常规油气资源,如盆地中心气、煤层气、页岩气、致密砂岩气、页岩油等逐渐成为全球油气储量、产量增长的重点领域和研究热点,非常规油气地质研究也取得长足进展。1995年美国联邦地质调查局(USGS)针对含油气盆地中致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中油气大面积聚集分布、圈闭与盖层界限不清、缺乏明确油气水界面的特点,提出了“连续型油气聚集”的概念,在非常规石油地质理论发展中具有里程碑意义,是非常规石油地质理论科学发展的重要标志和理论基础。基于这一概念,USGS对致密砂岩气、页岩气、盆地中心气、煤层气、浅层微生物气及天然气水合物等非常规天然气资源进行了评价(Schmoker, 1995, 1996, 1999; Jeffrey et al., 2004; Schmoker, 2005)。2007年国际石油工程师协会(SPE)、石油评价工程师协会(SPEE)、美国石油地质师协会(AAPG)和世界石油大会(WPC)在《油气资源管理系统》一文中认为连续型矿产和非常规资源基本等同,都定义为大面积连续分布、受水动力影响很小的油气聚集,包括盆地中心气、页岩气、天然气水合物、天然沥青及油页岩等,同时强调了其技术难度及经济可行性。国内一些学者将非常规油气的主要特征归纳总结为:连续分布,油气水界面不明显,无自然工业产量,同时指出非常规油气多数为源储共生型油气聚集(关德师等, 1995; 邹才能等, 2009a, 2009b, 2009c; 蒋裕强等, 2009; 聂海宽等, 2009; 赵靖舟, 2012; 贾承造等, 2012)。

基于渗透率和流体黏度,将非常规油气资源定义为:通过技术改变岩石渗透率或流体黏度,使得油气的渗透率与黏度比值变化,从而获得工业产能的油气资源(邹才能等,2011)。国内一些学者认为非常规油气储集空间主体为纳米级孔喉系统,局部发育微米—毫米级别孔隙,进而提出“纳米油气”概念,并指出“纳米油气”是未来石油工业的发展方向(邹才能等,2012a,2012b;崔景伟等,2012)。针对非常规储层致密的特点,许多学者利用各种实验测试技术对其微观孔喉特征进行了系统的研究(Schieber,2010;Slatt et al.,2011)。不同的孔隙结构决定了非常规储层的物性差异,孔隙类型、尺寸与排列不仅影响油气原地的赋存与聚集,而且影响储层扩散和渗流能力(Dewhurst et al.,2002;Schieber,2010;Ambrose et al.,2010)。在非常规运聚机制方面,前人也开展了广泛的研究,非常规油气单凭浮力无法实现有效运聚,生烃增压是连续型油气的主要运聚动力(卢双舫,1996;游君君等,2004;刘招君等,2005;邹才能,2010;张金川等,2004,2012)。一些学者在系统分析后,指出常规油气供烃方向会有非常规油气共生,非常规油气外围空间可能存在常规油气伴生,强调常规油气与非常规油气协同发展,提出了常规-非常规油气“有序聚集”理论(邹才能等,2014)。非常规油气聚集理论正引起越来越多的石油地质学家关注,已经成为目前石油地质学研究的前沿。

五、盆地流体与岩石相互作用

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之一。沉积盆地成岩作用旨在对地下相对高温高压条件下沉积岩石物理特性变化和水-岩相互作用的研究(解习农等,2009),早期研究偏重于静态成岩作用研究,而近年来随着盆地流体研究的深入,人们开始注意到盆地流体活动对成岩作用的影响,尤其是异常压力环境下流体活动规律及其相应的成岩响应成为人们十分关心和研究的热点问题(Hunt,1990;Neuzil,1995;焦大庆,1998;康永尚等,1999;Xie et al.,2003;Flemings et al.,2004)。解习农等(2009)分别探讨了碎屑岩和碳酸盐岩沉积区流体活动对成岩作用影响,指出成岩过程中的水-岩相互作用是地下一定温压条件下孔隙水的化学组分与储层矿物间的一种化学平衡作用,而盆地流体活动则通过改变孔隙水介质而影响其成岩反应。同时,利用成岩矿物的变化可以较好地指示盆地内流体活动特征。楼章华等(2002)指出不同孔隙水成因的局部水动力单元是决定松辽盆地扶扬油层砂岩成岩相类型的重要因素之一,而且各种成岩相特征、自生矿物组合、孔隙成因与孔隙组合都有明显的差别。岩石学和同位素分析方法被广泛应用于成岩作用研究,通过多期成岩产物判断流体活动期次(Bjørlykke et al.,1994),同时各种水-岩相互作用和成岩反应对孔隙空间具有明显的影响(朱国华等,1993;朱抱荃等,1996;顾家裕,2002;Scotchman et al.,2002;Nygård et al.,2004)。

流体作为化学物质和传输的载体积极地参与了各种地质地球化学过程(刘丛强,1998),对矿床的形成起着至关重要的作用,沉积盆地中许多大型、超大型金属层控矿床和油气田的形成、分布及油气的二次迁移,均与大规模流体的流动和水-岩间的相互作用有着十分密切的关系(Bitzer et al.,2001)。与盆地流体有关的主要矿床类型主要有:沉积喷流型矿床(Sedex型)(Large,1988);密西西比式(MVT)铅-锌-(钡-氟)矿床(Sangster et al.,1994);大陆砂页岩型铜、铀,以及铅、锌、钒、银、钴等矿床(Sanford,1994);沉积岩容矿的微细浸染型金矿床(刘建明等,2000)。

六、盆地流体示踪技术

盆地流体活动不仅改变了盆地内温度场和压力场,而且会导致不同的流体岩石相互作用。反过来我们可以利用岩石中残留的一些标记示踪流体活动。盆地流体示踪方法可概括为以下5个方面(解习农等,2003):

(一) 有机地球化学示踪

有机质在受到地质热事件的影响后其变化的敏感性要比无机质高得多,其成熟演化是一种不可逆反应(胡明安,1997)。且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,如有机质的成熟度及其产物——生物标志物可以揭示成矿过程中地质热事件的性质,显示成矿作用的地球化学特征,有机质的成熟异常还可以进行成矿预测和指示找矿方向(胡明安,2000;包志伟等,2000;徐庆鸿等,2005)。

(二) 无机地球化学方法示踪

新生成岩矿物和黏土矿物转换可示踪热流体活动,比如在中浅部的储层中由于淡水的渗入可导致长石的高岭石化。黏土矿物转换特别是伊蒙混层(I/S)的构成和有序性是地史时期古温度的有效标志。蒙脱石向伊利石转换的程度取决于温度、 K^+ 浓度和时间。正常情况下,可根据I/S混层的Reichweite有序度值变化情况判断地温梯度。在没有对流热作用地区伊-蒙转换是渐变的过程,而在对流热作用的地区伊-蒙转换之间存在跃变(Xie et al., 2001)。碳酸盐胶结物的微量元素(特别是Mn, Fe, Mg和Sr等)组合及其含量变化与古流体的来源与性质密切相关,是反应古流体活动的有效记录(Varti-Mataranga et al., 1998; Rossi et al., 2001; Hood et al., 2003; 胡文瑄等, 2006; 曹剑等, 2007)。

(三) 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(Davisson et al., 1996; Worden et al., 1999)。Varsanyi等(1997)通过匈牙利Pannonian盆地南部地层水研究表明,从补给区到排泄区地下水中离子浓度发生规律性变化,即沿流线钠离子增多,而钙和镁离子减少。Xie等(2003)通过莺歌海盆地地层水化学特征分析证实,超压段具有较低的矿化度,当超压段流体幕式突破进入常压段会导致地层水的淡化。锶同位素对证明地层水中锶的来源有着巨大的作用,同时说明了水岩相互作用的强度,以及区域地下水在流动过程中的混合程度。锶中 ^{87}Sr 的富集主要是由大陆侵蚀风化引起的,而其贫乏来自于地幔(Davisson et al., 1996); Barnaby等(2004)分析了新墨西哥宾夕法尼亚系碳酸盐储层地层水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,西部下倾岩层的比值明显高于东部上倾岩层比值,咸水中较高盐度和盐岩溶解的增加暗示着放射性 ^{87}Sr 来源于蒸发;史婷婷等(2012)以松辽盆地北部为研究对象,基于地层水的水文地球化学特征、锶-氢-氧同位素数据分析,探讨了水-岩反应与锶-氢-氧同位素的关系,判别出地层水的形成应主要以地表水(大气降水)为主,通过深大断裂循环,淋滤溶解地表以及地下各种岩石、矿物,发生水-岩相互作用,形成高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值流体与深部来源的低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值地质流体(火山-地热水)混合而成。

近年来,石油生成、运移和成藏演化过程中的无机地球化学记录引起了人们的广泛兴

趣(胡明安, 2000; 包志伟等, 2000; 徐庆鸿等, 2005)。烃类流体在运移途中会与地层中的岩石和水发生流体-岩石相互作用和物质交换, 流体和岩石中几乎所有的元素和同位素组成都受到了影响(曹剑等, 2007)。因此, 通过对流体和岩石元素/同位素组成的分析, 可以反演石油运移过程, 如 Cai 等(2001)通过研究塔里木盆地塔中地区的油田水的矿化度、各种离子和氢氧同位素变化规律, 认为研究区的油田水运移方向与油气运移方向一致, 展示了地层水无机地球化学在油气运移中的应用。

(四) 流体包裹体示踪

沉积盆地自生矿物中的流体包裹体是成岩成矿流体在矿物结晶生长过程中, 被包裹在矿物晶格缺陷或窝穴中的、至今尚在主矿物中封存并与主矿物有着相的界限的那一部分物质(施继锡, 1987)。流体包裹体测得的均一化温度和压力代表了包裹体形成时的最低温度和压力(Roedder et al., 1980), 反映盆地内部热液活动及油气运移的某些特征, 对油气成藏条件的分析具有较大的参考价值。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。流体包裹体及稳定同位素示踪成矿物质来源(李胜荣等, 1991; 周作侠等, 1993; 范宏瑞等, 2000; 毛景文等, 2000)。张连昌等(2002)和薛建玲等(2013)利用黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素对胶东邓格庄金矿床矿物质来源进行示踪; 李永峰等(2005)利用流体包裹体 He、Ar、S、H、O 同位素组成对豫西公峪金矿床成矿流体来源进行了判断; 朱赖民等(2009)开展了华北地块南缘钼矿床黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素体系及其对成矿动力学背景的示踪研究。孙晓明等(2004)总结了流体包裹体中微量气体组成及其成矿示踪体系, 共包括 N_2 -Ar-He 体系、 CO_2/CH_4 - N_2 /Ar 体系、 CO_2 - CH_4 - H_2 体系、 CO_2 - CH_4 - C_2H_6 体系、 CH_4 - C_2H_6 - C_3H_8 体系及 C_2H_6 - C_3H_8 - C_6H_6 体系。

(五) 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。如在现今海底形成由流体逸散后流下的麻坑并发现有气苗, 中浅层显示有“气烟囱”(Davison et al., 2000)。

稳定同位素在盆地流体研究中的常规应用包括了示踪性, 盆地流体研究中涉及的稳定同位素主要有氧、氢、碳、硫、氮, 其中碳元素示踪碳酸盐岩和二氧化碳来源, 氧元素示踪地层水来源、水-岩相互作用等, 氢元素主要用来判断地层水和含水矿物的来源, 硫元素可用来指示含硫矿物来源(郑永飞等, 2000)。流体中稳定同位素是了解地下流体来源与成岩变化的重要途径之一(李延河, 1998)。Ballentine(1996)认为通过对地层流体中同位素的精确定量分析, 可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。Criss(1987)从开放体系/交换动力学的角度对水-岩交换进行了研究, 建立了几种定量-半定量的模型。

七、盆地流体模拟技术

盆地流体模拟的中心任务是盆地流体运动过程模拟和流-岩相互作用过程模拟。盆地流体模拟所遵循的基本准则是孔隙流体运动的达西定律、能量守恒和质量守恒定律。由此

建立孔隙流体的温度和压力的耦合方程,利用有限元法解上述非线性耦合方程,从而可动态地恢复盆地不同演化阶段的温度场、压力场和流体场(解习农等,1999)。在20世纪80年代,人们遵循流体运动的达西定律和质量守恒定律编制一系列盆地流体运动学模拟软件,如1986年美国伊利诺斯大学地质系利用有限差分法推出了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。盆地流体既是油气运移、聚集的载体,也是其他成矿流体的载体。所模拟的古水动力场及演化特征可以作为其他模拟研究的基础,比如油气成藏动力学模拟、流体-岩石相互作用过程模拟、与地下水活动相关的生物作用过程模拟等。近年来在该领域的发展也逐渐从单一模型向流体动力学过程与水-岩相互作用的化学动力学过程结合的系统动力学模型的发展(解习农等,2003)。

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。如陈繁荣(1995)曾以江西银山矿床为例,利用计算机模拟研究了成矿流体的演化对金属元素迁移、沉淀的影响;周涛发等(2002)通过安徽月山(铜、金)矿田成岩成矿作用研究,认识到岩浆水与流经岩石的水-岩作用不仅对成矿流体中矿质的进一步富集具有重要意义,而且水-岩作用、大气降水的混入作用引起的成矿热液系统物理化学条件的变化,是成矿物质从成矿流体中沉淀成矿的主要原因;夏林等(2003)模拟了湖北铜山口铜(铝)矿床的水岩反应和金属沉淀过程;张军涛等(2011)选取川东南地区志留系龙马溪组盖层泥岩,在不同温压条件下,与淡水和含乙酸流体进行水岩反应实验模拟,研究盖层在不同的成岩环境下,水岩反应对储层形成及油气保存方面的影响;王崇等(2012)基于水岩反应滴定计算模型对泥河铁矿床叠加蚀变带进行了水岩反应的数值模拟,获得了泥河铁矿床叠加蚀变阶段的成矿流体与对应原岩反应的物理化学条件变化,以及矿物溶解/沉淀变化的过程。Reed等(1986)、Lu等(1992)对斑岩铜矿体系的矽卡岩化过程进行了数值模拟,在此过程中已经建立了比较完善的水岩反应模型。近年来在该领域的发展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结合(Gouze et al., 2002)。尽管盆地流体模拟技术尚待完善,但计算机模拟为定量描述或刻画沉积盆地在三维空间及整个演化历史中的流体或油气成藏过程提供了有效的工具,从而使我们获得对盆地流体形成演化随时间的立体的、动态的概念和认识。

第三节 非常规能源流体地质学课程内容及要求

近年来,世界范围内的常规油气资源紧缺的问题越来越严重,非常规油气资源的大规模开发逐渐提到日程上来。随着我国国民经济的持续快速发展,油气供需矛盾也已经成为制约我国经济和社会发展的主要瓶颈之一,非常规油气资源勘探开发逐渐成为国内能源可持续发展最现实的解决途径之一。中国非常规油气资源非常丰富,致密油气、页岩油气、煤层气、油砂、油页岩和天然气水合物等开发利用潜力巨大,是目前最为现实的接替能源。非常规油气资源的勘探开发和利用与常规油气资源存在着较大差异。

沉积盆地作为一个动力学演化的整体(Allen et al., 2005),随着盆地的动力学演化,

地层流体产生并流动,并导致盆地内温度、压力和流体化学成分的变化,尤其是其潜在的热和质的传输能力,对各类矿藏的形成、聚集具有关键作用。因此,沉积盆地中流体场可用其化学组成、温度和压力3个特征量来表示,研究的主要内容包括流体温度场、流体化学场、流体动力场及其演化过程。

非常规能源流体地质学课程通过介绍含油气区(盆地)地下水的形成过程、赋存条件及分类,流体温度场与压力场的形成机制,流体驱动因素与运聚机制,非常规油气聚集机制与成藏类型,流体-岩石作用模式与作用类型,流体示踪技术和流体模拟原理与方法,使学生了解非常规油气生成、运移、富集成藏过程中流体的类型,理解流体温度场、压力场和化学场的基本性质和特征,掌握研究非常规油气区流体场演化过程的基本理论和基本方法。