

砂岩动力成岩作用

寿建峰 张惠良 斯春松 等著
王 鑫 陈子料 王少依



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

P588.21
S-417

砂岩动力成岩作用

寿建峰 张惠良 斯春松 等著
王 鑫 陈子料 王少依

石油工业出版社

内 容 提 要

本书提出了“动力成岩作用”的概念和研究方法,介绍了动力成岩系统,包括岩石的物理性质、盆地流体、盆地热流、构造活动等对岩石成岩压实作用的影响,也包含了系统内物质的转化迁移、沉淀、溶解以及系统内外物质的交换。它们从不同的作用方式和作用强度控制着岩石的成岩演化途径和速率。本书侧重于成岩物质和盆地动力学环境与成岩压实作用的规律和机制的内在联系的研究。

本书可供地质工作者及相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

砂岩动力成岩作用/寿建峰等著.
北京:石油工业出版社,2005.4

ISBN 7-5021-5020-X

I. 砂…

II. 寿…

III. 砂岩-成岩作用

IV. P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 017691 号

砂岩动力成岩作用

Shayan Dongli Chengyan Zuoyong

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心排版

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.25

字数:258 千字 印数:1—800 册

定价:32.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

一、本书的意图

碎屑岩是我国北方沉积盆地的主要含油气储层,其储集性质的优劣直接关系到油气藏(田)的规模。因此,碎屑岩储层性质的评价和预测是油气勘探开发中重要的研究内容,历来受到石油地质学家和勘探家的重视。在我国北方的含油气盆地中,碎屑岩储层受其自身的物质特征和盆地的动力学环境的控制在时空上变化较大,压实作用、胶结(交代)作用和溶蚀作用是引起储层变化的3种成岩作用。在这3种成岩作用中,除了局部地区(如盐湖盆地)或局部层段的成岩胶结物较发育,形成较高含量的碳酸盐、膏盐或沸石类胶结外,砂岩中胶结作用的规模并不是制约储层性质的重要因素。此外,砂岩中的溶蚀现象比较普遍,一定地质背景下或局部地区(层段)的溶蚀规模也可以较大(如鄂尔多斯盆地三叠系延长统浊沸石和柴达木盆地北缘石泉滩地区下侏罗统长石、岩屑等的溶蚀作用),但在多数情况下其溶蚀规模也是比较有限的。因此,砂岩的成岩压实作用决定或基本决定了砂岩储层孔隙体积的大小以及储集油气的有效性。而成岩压实作用的影响因素很多,它不是通常意义上的深度或地层温度等指标所能概括,在某些地质背景下也并非为地温场、地层埋藏史(或热演化轨迹)和地层流体等因素所能解释的。实际上,成岩作用是个复杂的动力成岩系统,它不仅受控于盆内的“内动力地质作用”,也受盆外的“外动力地质作用”的影响,从而使砂岩的成岩作用既表现为连续性和阶段性,也体现出突变性和阶递性。这些成岩特征与盆地的类型和盆地的动力学环境有着密切的联系。显然,寻找这种内在的联系对认识砂岩的成岩作用规律,评价和预测我国复杂地质背景下的有利储层的分布都是很有现实和理论意义的。

因此,本书试图将砂岩的成岩作用(尤其是成岩压实作用)置于盆地的动力学环境中,研究一定成岩物质的砂岩的成岩作用和孔隙演化与包含盆地类型、构造变形、盆地热流、盆地流体、热演化轨迹以及地质作用时间等因素的盆地动力学特征的联系性,揭示时空上砂岩的成岩演化规律和成因机制,建立成岩演化模式,钻前定量预测砂岩的储集性质,达到寻找有利油气储层的目的。

二、本书的内容要点

本书的中心要点是提出了“动力成岩作用”的概念和研究思路,认为这个复杂的动力成岩系统既包含了岩石的物理性质、盆地流体、盆地热流、构造活动等对岩石成岩压实作用的影响,也包含了系统内物质的转化、迁移、沉淀、溶解以及系统内外物质的交换等。它们从不同的作用方式和作用强度控制着岩石的成岩演化途径和速率。本书侧重于成岩物质和盆地动力学环境与成岩压实作用的规律和机制的内在联系。其内容要点体现在以下4个方面。

(1)砂岩的成岩作用是在盆地内、外动力地质作用下进行的,它既受盆地内部的类似于低温化学—物理反应器的埋藏热效应的地质作用的控制,也可受到盆地构造变形以及基底活动等过程中构造应力的影响,从而使砂岩的成岩作用既表现为受控于埋藏热效应的连续性和阶

段性,也体现出受构造活动影响的突变性和阶递性。对于后者,本书提出了构造侧向挤压、构造滑脱推覆和基底块断隆升等3种构造活动方式对砂岩成岩作用的影响,较详细地讨论了前两种构造活动对孔隙体积减小的作用效应,建立了构造侧向挤压应力与砂岩减孔量的定量关系,从而将碎屑岩的成岩作用与构造地质作用联系起来,体现了油气储层地质学与构造地质学这两门学科的结合。

(2)砂岩的成岩压实作用受到了成岩物质、上覆岩石载荷、盆地热流、地层流体、地质作用时间、埋藏热演化轨迹和构造活动等因素的控制。成岩物质影响一定成岩环境中的水—岩反应的速率和规模以及砂岩的抗热性和抗压性,从而控制了砂岩的成岩演化。上覆岩石载荷和构造应力是直接施加于岩石并使岩石孔隙体积发生变化的有效应力;热流、流体、时间和埋藏热演化轨迹等因素是以间接作用方式加快或延缓岩石孔隙体积发生变化的作用。在成因机制上,砂岩的成岩压实机制有上覆岩石载荷引起的埋藏压实、构造活动引起的构造压实、盆地热流引起的热压实以及流体作用引起的压实效应等4种类型,从而更深入、客观地认识了砂岩成岩压实作用的速率和孔隙演化的特征。

构造活动对砂岩成岩作用的影响在我国中西部含油气盆地中是个较普遍的现象,对砂岩成岩压实作用的影响也较显著。在平均意义上,每增加1.0MPa的水平构造应力,可使砂岩孔隙度降低0.1051%。而在我国西部盆地中,定向岩石样品的古岩石应力测试所获得的最大水平构造应力可达100~150MPa左右,它引起的减孔量是比较可观的;构造变形方式对砂岩成岩压实作用也有影响,晚期构造滑脱推覆作用可使相同埋藏深度下的砂岩多保存5%~6.5%的孔隙度。这为西部含油气盆地中大型构造推覆体下寻找良好储层提供了认识基础。

在单一盆地热流、没有较强的构造外力作用、简单且基本相同的埋藏史情况下,可以用人们常常应用的深度与砂岩孔隙度之间的经验指数关系加以表征。但如果把这种简单关系不分具体的地质条件而加以普遍应用就会出现较大的误差。如在等深度上,我国东部较高地温梯度盆地的砂岩孔隙度要小于西部较低地温梯度盆地,盆地之间的地温梯度差异越大,相同深度上砂岩孔隙度的这种差异也越大,故用东部盆地的砂岩孔隙演化模式去预测或模拟西部盆地的砂岩孔隙演化显然是不合适的。正因为由于盆地热流的影响,在相同的地层温度下,西部低地温梯度盆地的砂岩孔隙度也要大于东部高地温梯度盆地。所以,盆地热流不仅影响了化学成岩作用,还显著加快了成岩压实速率,地温梯度每增加1.0℃/100m,孔隙度可平均下降约5.0%~7.0%,或1℃的地温梯度增量对应于平均约1500m厚的上覆岩石载荷的压实作用效应。砂岩所经历的热演化轨迹对成岩作用有较大影响,这种影响是由成岩演化进入某一时刻的岩石载荷压实量(或热效应)不同或进入某一岩石载荷压实量(或热效应)的时间不同引起的;时间本身并不直接作用于成岩反应,但任何成岩作用都是在一定的时间内完成的。相同条件下每增加百万年的地质作用时间,可使孔隙度减少0.009%~0.041%。上述3个参量的综合作用效应可用热成熟度参量加以定量表征,它可以反映连续型埋藏热效应成岩作用的特征。地层流体对成岩压实作用的影响表现为两个方面,一是早期形成的地层高压流体可减缓砂岩的压实作用;二是早期地层酸性流体对碎屑颗粒的溶蚀降低了颗粒格架的支撑力,从而加快了后期的成岩压实作用。

(3)侧重从砂岩成岩演化的控制因素和成因机制的角度,把砂岩成岩作用分为埋藏热效应、埋藏热效应—构造应力和埋藏热效应—流体作用等3种端元的成因类型。每种成因类型

又分为若干亚类,在实际研究中还会经常碰到上述几种成因类型的过渡形式。埋藏热效应成因类型指的是沉积物进入埋藏成岩作用后,主要在上覆岩石载荷和盆地热流(包括局部热源)的作用下使岩石体积逐渐发生变化的作用过程,表现出成岩演化的连续性和阶段性。埋藏热效应—构造应力成因类型指的是砂岩在经受埋藏热效应成岩作用的过程中,还受到了构造活动的影响,表现出成岩演化的阶递性和突变性;埋藏热效应—流体作用为砂岩在经受埋藏热效应成岩作用的过程中,还受到地层流体的明显影响而延缓或加快砂岩的成岩作用。

(4)建立了砂岩储层性质的地质预测的经验公式:①不同岩石类型的热成熟度与孔隙度;②地温梯度与孔隙度;③构造应力与孔隙度;④异常流体压力系数与孔隙保存量。讨论了有效砂岩储层的最大保存深度以及有效孔渗砂岩率的预测方法。这些经验公式为石油地质工作者提供了砂岩储层性质的预测方法和经验版图。

三、本书的结构特点

本书共分5章,内容包括研究方法、作用参量、成因机制、成因类型和定量地质预测等方面。全书的重点在于成岩压实作用的参量和机制以及动力成岩作用的成因类型及其特征,从基本原理、作用效应、成因机制和定量预测,并结合实例加以叙述。各章节的主要内容如下:

第一章,在简要地说明为什么我们更感兴趣的是砂岩压实作用的规律和规模以及目前成岩作用研究的主要特点的基础上,阐述了砂岩动力成岩作用与定量地质预测的研究方法。

第二章,简要地概述了我国北方地区典型含油气盆地成岩作用的沉积地质背景和物质基础,着重叙述了砂岩的孔隙类型及其发育特点、成岩胶结作用和成岩压实作用的特征及其占总减孔量的比例。

第三章,分成岩物质和盆地动力学特征两部分详细阐述了各成岩压实作用参量的作用效应和控制机理。成岩物质方面讨论了岩矿成分成熟度、岩屑成分成熟度和粒径对压实作用和孔隙保存的影响;盆地动力学特征方面讨论了地层温度、地温梯度、构造形变、热演化轨迹、地质作用时间和地层流体等因素与成岩作用的关系及其机制。

第四章,侧重于从砂岩成岩演化的控制因素和成因机制的角度,讨论埋藏热效应、埋藏热效应—构造应力和埋藏热效应—流体作用等成因类型的特征,结合实例详细讨论了埋藏热效应和埋藏热效应—构造应力等成因类型的成岩作用特征。

第五章,结合实例介绍了储层性质定量地质预测的技术思路以及多种方法的经验公式,它包括孔隙度、最大有效储层的埋深下限以及砂岩孔渗有效率的预测。

最后要指出的是,该专著为作者十余年来从事我国北方含油气盆地砂岩成岩作用和储层评价研究工作的总结。在书稿完成之际,我特别感谢朱国华教授自1994年以来一直给予的热忱支持和指导!感谢杭州地质研究所有关同仁给予的帮助!感谢蒙绍兴同志为专著的文字、图件编辑和绘制付出的辛苦劳动!最后,十分感谢刘宝珺院士在百忙中为本书作序!

序

碎屑岩是我国主要的含油气储层,其储集性质的优劣关系到油气藏(田)的形成和规模,因此碎屑岩储层评价和预测是油气勘探开发中的重要研究内容。我国地质工作者为此做了大量的研究,使油气储层地质学不断得以发展。但我国含油气盆地的地质条件十分复杂,它们深刻地影响着碎屑岩的成岩作用和储集性质,这增加了碎屑岩储层研究的难度,同时也为深入探索碎屑岩的成岩作用规律提供了机会。

寿建峰教授自 1983 年参加工作以来一直从事我国油气储层的研究工作,尤其对我国北方含油气盆地碎屑岩的成岩作用和储层评价做了大量的研究工作,掌握了第一手翔实的资料,取得了诸多有见解的认识。寿建峰教授在砂岩的成岩压实作用规律及其成因机制方面进行了创新性的研究,并有独到的见解,提出了砂岩动力成岩作用的概念和研究思路,将砂岩的成岩作用与盆地的动力学环境联系起来研究成岩压实作用的规律和成因机制。作者认为这个复杂的动力成岩系统包含了成岩物质、盆地热流、盆地流体、构造活动、埋藏热演化轨迹和地质作用时间等,它们从不同的作用方式和作用强度控制着砂岩成岩演化的途径和速率。在成因机制上,根据砂岩的成岩压实作用有上覆岩石载荷引起的埋藏压实、构造活动引起的构造压实、盆地热流引起的热压实以及流体作用引起的压实等 4 种类型,进而将砂岩成岩作用分为埋藏热效应、埋藏热效应—构造应力和埋藏热效应—流体作用等 3 种端元的成因类型;总结出埋藏热效应成因类型表现为连续性、阶段性、间断性和逆转性的成岩演化特征,而埋藏热效应—构造应力成因类型的最大特点是成岩演化上的突变性和阶递性。这些认识丰富了油气储层地质学的研究内容,拓宽了研究思路。该专著的另一大特点是建立了砂岩孔隙度的定量预测模型,这对钻前定量预测储层性质,指导油气勘探是很有帮助的。

刘金君
2004年6月20日

目 录

第一章 研究现状和方法概述	(1)
第一节 问题的提出	(1)
第二节 研究现状	(2)
第三节 研究方法概述	(4)
第二章 成岩作用的地质背景和物质基础	(8)
第一节 典型盆地的沉积地质背景	(8)
一、陆内裂谷盆地	(8)
二、克拉通内坳陷盆地	(10)
三、碰撞造山带内盆地	(11)
四、前陆盆地	(12)
第二节 中、新生界砂岩储层的基本特征	(13)
一、发育冲积扇—河流—(扇)三角洲—滨浅湖砂体	(13)
二、以成分成熟度低、结构成熟度中等—较差的岩屑砂岩为主,其次为岩屑长石砂岩和长石砂岩	(13)
三、原生粒间孔隙的分布较普遍,局部地区次生孔隙较发育	(15)
四、成岩作用变化较大,压实作用是储集性质的主要控制因素	(21)
第三章 压实作用的动力参量和机制	(26)
第一节 成岩物质特征	(27)
一、成分成熟度	(27)
二、结构成熟度	(32)
第二节 盆地动力学特征	(35)
一、盆地古地温梯度	(35)
二、热演化轨迹	(41)
三、构造变形作用	(48)
四、地质作用时间	(63)
五、流体作用	(68)
第四章 动力成岩作用的成因类型	(76)
第一节 埋藏热效应成因类型	(76)
一、含义及演化阶段	(76)
二、连续埋藏亚型的特点	(78)
三、非连续埋藏亚型的特点	(80)
第二节 埋藏热效应—构造应力成因类型	(81)
一、含义及作用方式	(81)

二、成岩作用的特点	(83)
第三节 埋藏热效应—构造应力成因类型的研究实例	(88)
一、吐哈盆地	(88)
二、库车坳陷下侏罗统	(106)
第四节 埋藏热效应成因类型的研究实例	(117)
一、砂岩岩石学特征	(117)
二、成岩作用的基本特征	(119)
三、砂岩成岩控制因素与成因类型	(121)
第五章 砂岩储层性质的定量地质预测	(127)
第一节 基本思路	(127)
第二节 预测方法及模型	(128)
一、砂岩热成熟度法	(128)
二、地温梯度法	(135)
三、压实减孔量法	(136)
四、有效储层保存深度下限的预测	(137)
五、砂岩有效率的预测	(138)
第三节 实例研究	(140)
一、准噶尔盆地侏罗系	(140)
二、吐哈盆地中—上三叠统	(147)
参考文献	(152)

第一章 研究现状和方法概述

第一节 问题的提出

在研究成岩作用对砂岩储集性质的影响时,常常把这种影响归结为压实作用(包括机械压实作用和化学压实作用)、胶结(交代)作用和溶蚀作用,后二者的作用效应与水岩反应的速率和规模有关。在碎屑岩中,它们受控于硅酸盐的化学动力作用(J. T. Smith,引自梅博文等编译,1991;S. N. Ehrenberg,1989),目前对其作用规律和规模尚较难进行定量化的钻前预测。但在我国含油气盆地中,除了局部地区(如盐湖盆地)或局部层段的化学胶结物普遍较发育,形成高含量的碳酸盐、膏盐或沸石类胶结外,砂岩中胶结作用的规模往往是有限的,它的孔隙损失量的绝对值一般小于10.0%,占砂岩孔隙总损失量的比例一般在10.0%~30.0%之间;或者说,相对于压实作用而言,它对储集性质的影响居于次要地位。如考虑胶结作用在一定程度上对后期的压实作用有所抑制的话,则这种影响会进一步减小。

砂岩中的溶蚀现象是比较普遍的,一定的地质背景下(如长期暴露地表的大气水淋滤溶蚀作用)和局部地区或层段的溶蚀规模也可以较大,如鄂尔多斯盆地三叠系延长统浊沸石的溶蚀作用有一定的普遍性,使其成为重要的油气储集空间;柴达木盆地石泉滩地区下侏罗统长石、岩屑的溶蚀作用也较强,如冷103井的溶孔绝对量可达9.8%。但在多数情况下溶蚀规模往往是有限的,其溶孔绝对量一般小于5.0%,占砂岩储集空间的相对比例一般小于30.0%;此外,在讨论溶蚀作用的规模时,要区分溶孔量的绝对量和相对量。这里所指的是溶孔量的绝对量,因为溶孔相对量有时并不能真正反映溶蚀作用的规模,如随着砂岩储集性质的变差,溶孔相对量会相应提高,而其绝对量仍然可以很小(见第二章)。所以,胶结作用和溶蚀作用是研究砂岩成岩作用和孔隙演化的一个重要内容,但在分析砂岩的固结程度和相应的储集性质的影响因素时,它们往往不是一个决定性的因素。从这个意义上讲,我们更感兴趣的是砂岩压实作用的规模和规律。

砂岩中次生孔隙的成因研究已取得了不少认识,尤其是次生孔隙的有机成因说普遍为大家所应用,但Surdam、Crossey等在20世纪80年代论述次生孔隙成因时提出了孔隙度增加或保存的最佳条件:①富烃源岩与储层相邻;②储层地质年代晚于白垩纪;③储层经历简单的埋藏史;④有机酸在泥岩中的居留时间不长;⑤有流体流动和运移通道。从这些条件可以看出,次生孔隙的形成,尤其是有实际意义的次生孔隙的形成是有诸多地质条件限制的,就如油气藏的形成必须具备时空上成藏地质要素和成藏地质作用的有机配合一样。根据Surdam等对次生孔隙形成条件的论述,我国东部含油气盆地的第三系更利于形成较发育的次生孔隙,而西部含油气盆地在应用次生孔隙的有机成因说时其局限性会变得大些。从目前我国对砂岩中次生孔隙的研究现状来看,有关次生孔隙的问题似乎要进一步认识,其争论也将继续下去。问题的焦点在于溶蚀物质的确定、溶蚀孔隙的识别以及溶蚀规模的界定等。砂岩组分有明显的溶蚀痕迹,则可估算出溶蚀量;而对没有明显溶蚀痕迹的骨架颗粒和胶结物则很难判断其溶蚀量。在这种情况下,如仅根据次生孔隙的有机成因说观点,将某深度或地层温度区间作为次生孔隙的有利生成窗或发育带,从而把碎屑颗粒之间的空隙作为次生孔隙的观点可能是值得商榷的;

同时把某一深度剖面上的孔隙度正偏离趋势线的部分作为次生孔隙也可能有失客观性。关于砂岩中碳酸盐的溶蚀规模问题也是次生与原生观点争论的焦点之一。从化学平衡反应的原理上讲,在封闭成岩体系中,砂岩中一般趋向于碳酸盐的沉淀,而不是溶解(引自梅博文等编译,1991)。实际上,在我国含油气盆地中观察到的铝硅酸盐矿物的溶解要明显多于碳酸盐矿物,也常常可以见到长石、岩屑颗粒被溶蚀而碳酸盐胶结物或颗粒没有明显溶蚀痕迹的现象。此外,大量次生孔隙的形成还有一个重要条件,就是发生大规模的被溶物质的迁移,而这种迁移依赖于地下有足够的流体以及存在相应的排泄流体和矿物质的通道。在地下半封闭或封闭成岩环境下,使砂岩的矿物成分与孔隙流体较快地达到平衡是一种必然的水岩反应结果(引自梅博文等编译,1991),在地下流体流速缓慢或近于停滞的成岩环境下,达到这种平衡的时间会大大缩短,或者只是将部分原生孔隙转化为大体等量的次生孔隙(引自梅博文等编译,1991)。因此,在确定是否存在次生孔隙及确定次生孔隙的规模时,除了观察岩石结构特征外,还要结合分析次生孔隙形成的地质背景和砂岩的孔隙结构特征(如次生孔隙砂体的非均质性一般较强、孔隙度和渗透率之间的相关性往往较差等等)。

研究我国北方含油气盆地砂岩的成岩作用特征时,我们发现压实作用在很大程度上是砂岩储集性质的主导因素,压实作用的强弱控制着砂岩储集性质的好坏。因此,研究砂岩压实作用的规模和规律对油气储层评价具有重要意义。但影响压实作用的因素很多,并且不是通常意义上的深度或地层温度等指标所能概括。在单一盆地热流、没有构造外力作用、简单且基本相同的埋藏史情况下,可以用人们常常应用的深度与砂岩孔隙度之间的经验指数关系($\phi = ae^{bz}$,式中, ϕ 为孔隙度/%, z 为深度/m, a 、 b 为常数)加以表征;但如果把这种简单的关系不分具体的地质条件而加以普遍应用就会出现较大的误差。如在相同深度上,我国东部较高地温梯度的裂谷盆地的砂岩孔隙度小于西部较高地温梯度的挤压盆地,盆地之间的地温梯度差异越大,相同深度上砂岩孔隙度的差异也越大,所以,用东部裂谷盆地的砂岩孔隙演化模式去预测或模拟西部挤压盆地的砂岩孔隙演化显然是不合适的。正因为由于盆地热流的影响,不同盆地性质之间在相同地层温度下的砂岩孔隙度也有变化,如地层温度同为80.0℃的情况下,塔里木盆地的砂岩孔隙度会高于松辽盆地;在同一性质的盆地内部(如相同的盆地地温场和流体性质等),砂岩的成岩压实作用和孔隙演化仍有较大差异,即使在限定条件下,这种差异也是很明显的,而这种差异并非为砂岩的岩性(组分和结构等)、地温梯度、地层温度、地层流体性质等因素所能解释的。在此基础上的进一步研究还发现,处于盆地不同构造应力位置的砂岩的成岩压实作用和孔隙演化有明显区别,表明砂岩的成岩作用与盆山构造耦合也有着内在的联系,进而表明了成岩作用并不仅仅受控于盆内的“内动力地质作用”,也受盆外的“外动力地质作用”的影响。正是由于这种影响,使砂岩成岩作用既表现为连续性和阶段性,也体现出突变性和阶递性。而寻找这种内在联系对于认识砂岩的成岩作用规律、预测有利储层的分布有较大的实际意义。因为我国含油气盆地的性质和演化具有多样性和复杂性,它们给砂岩的成岩作用产生了重要的影响。因此,在研究砂岩成岩作用时,从盆地动力学特征的角度研究砂岩的成岩作用,建立它们之间的内在联系,揭示盆地范围乃至更大尺度的砂岩成岩作用的规律是十分重要的。

第二节 研究现状

碎屑岩储层成岩作用的控制因素和成因模式是油气储层地质学研究的核心,也是油气储层地质评价和预测的关键。国内外学者对此进行了许多研究,提出了各自的适合地域特点的

认识或观点。其学科研究的热点和发展趋势体现在流体地质学与成岩—成藏的动力作用效应、盆山耦合与成岩动力作用效应以及动力成岩作用的定量模拟等方面。

地质时期中的地层流体与岩石之间的相互作用已引起不少学者的兴趣,并正在逐步形成“流体地质学”这一学科。近 10 年来,国际上召开了一系列学术会议,专门讨论“水—岩相互作用”与“地质流体”。无疑,流体在砂岩成岩和油气成藏中起着十分重要的作用。但由于流体地质作用是一个复杂的地质过程,还有许多理论和技术难题需要进一步解决,如流体作用的过程、规模和自组织动力机制等。随着流体包裹体、稳定同位素及各种岩矿测试技术的进步,该学科在石油地质学领域的应用取得了一些认识。已经初步认识到,高压振荡流体活动可能对某些自生硅酸盐环带矿物、大尺度条带状“穿层”的碳酸盐胶结分带、促进烃类生成以及烃类的幕式运移—聚集的形成产生重要控制(Nur, *et al.*, 1990; Dever, *et al.*, 1988, 1990; Chen, *et al.*, 1990; Tigert, *et al.*, 1990; Williamsom, 1995)。国内的朱家祥等在研究东濮盆地第三系、寿建峰在研究开鲁盆地侏罗系时也注意到了这种“穿层”的碳酸盐胶结带,并认为它是一种成岩过程中的自发性化学振荡现象(朱家祥等, 1995),或与水溶液中钙离子的振荡性释放有关(寿建峰等, 1995)。盆地热沉降过程中压实水流非常缓慢,不可能引起有意义的温度场扰动和成岩—成矿作用(Bethke, 1985; Aplin, *et al.*, 1993; Pedersen, *et al.*, 1994),而异常高压囊重复开—合过程引起的振荡(脉冲)流体确是沉积地壳乃至岩石圈演化过程中经常发生的地质事件。这种自组织动力机制极可能在较大尺度上对溶蚀—胶结成岩过程和成岩带结构产生制约(Chen, *et al.*, 1990; Tigert, *et al.*, 1990; 李忠, 1998; Xie, *et al.*, 1990)。Wang Chiyuen(1999)等用北海油田泥岩样品进行了高压振荡流体的幕式作用的模拟实验,表明泥页岩中流体、热流的振荡性释放导致孔隙度的振荡性变化的现象确实存在,对储层的成岩作用和机理产生了更深入的认识。Wilson(1988)较系统地讨论了挪威 VENTURE 气田异常高压流体与砂岩孔隙生成之间的关系,认为深层(大于 4500m)优质储层的成因与异常高压流体作用和溶蚀作用有关。费卫红、李忠等(2003)对东濮凹陷异常高压与流体活动及其对储集砂岩成岩作用的制约研究也表明异常高压流体的确对砂岩的成岩压实作用具有抑制作用,并且这种作用可能显示幕式活动。但也有研究表明,孔隙流体压力的增加会使岩石变形所需应力值降低,形变量反而显著增大(引自张厚福, 1999)。Heard(1960)对石英岩在各种孔隙流体压力作用下的物理模拟实验也得出类似结果。尽管目前还不能确切了解这种作用的影响程度,但这种现象可能是存在的;另外,也发现在异常高压流体带内碳酸盐等胶结作用出现增强趋势(寿建峰, 2000, 内部资料)。所以,异常高压流体对砂岩成岩作用的影响是多方面的,目前对其认识还十分肤浅。

Scherer(1987)认识到深度仅仅是一个类似于纵坐标和横坐标的位置参数,而不是一个反映砂岩成岩作用过程的好的指标;Schmoker *et al.* (1988)建立了时间、温度或镜质组反射率与储集性质的经验关系,指出岩石成分、地层温度和时间对储层性质的控制作用;James W. Schmoker(1988)认为地下砂岩孔隙度的损失可以表示为时间—温度指数的函数关系;Maxwell(1964)通过室内实验对石英砂岩建立了时间、温度与孔隙度之间的数学关系式,得出时间与孔隙度之间为线性关系,而温度与孔隙度之间呈指数关系。Von Gonten 和 Choudhary(1969)进行类似研究也认为温度的提高将明显增大岩石的压缩率;S. Bloch, J. H. McGowen(1990)讨论了地层埋藏史对砂岩孔隙度的影响,所研究的两套白垩系砂岩由于经历不同的埋藏史而使保存下来的孔隙度差异较大。1993 年 AAPG 组织出版了《Diagenesis and Basin Development》,认为成岩事件是盆地演化过程中某一时间的产物,而不一定对应某一深度。这个认识是正确的。

我国从“八五”、“九五”以来,油气盆地的成岩作用研究取得较大进展,已将成岩作用研究由局部的单井或地区扩展到整个盆地范围,在地温场、流体场和应力场对储集性质的影响方面的研究取得了进展,并根据湖盆流体水介质性质和成岩物质(砂岩类型)的不同以及水—岩相互反应结果的差别,建立了淡水—半咸水盆地、盐湖盆地和含煤盆地的砂岩成岩模式(应凤祥等,引自胡见义,2003),认为淡水—半咸水盆地(我国东部的裂谷盆地)的主要特征是成岩早期的压实和胶结作用相对较弱,并出现多期次生孔隙发育带,物性较好,粘土矿物演化序列正常。碱性水介质的盐湖盆地(如江汉盆地)以广泛发育碳酸盐、硫酸盐和沸石类为特点,是减少储层原生孔隙的重要因素。晚期溶蚀作用利于形成次生孔隙,使物性有所变好;粘土矿物成分单一,由蒙脱石快速转化为伊利石,而主要不受温度的控制。酸性水介质湖盆(含煤盆地)在成岩早期的碳酸盐类胶结作用弱,因此,压实作用强是导致大量原生孔隙损失的重要原因。而晚期有机酸对硅酸盐矿物的溶解使次生孔隙成为主要的孔隙类型,同时由于压实和自生矿物充填使喉道变细,因而孔大喉细是储层的重要特征。王鑫、朱国华等(2000,内部资料)在研究准噶尔盆地下侏罗统砂岩成岩作用时进一步提出了煤系地层中早期有机酸对长石、岩屑的溶蚀降低了碎屑颗粒的抗压性而明显加快成岩晚期的压实速率的观点。因此,煤系储层在成岩和孔隙演化上的特殊性不仅反映在煤系储层化学成岩作用的增强,更主要的可能是通过化学、物理的共同作用明显加快了砂岩的压实作用(寿建峰等、王鑫等,2002,内部资料),但对这种作用的机制和影响程度需要做进一步的研究。朱国华等(1990)提出低地温场和晚期快速埋藏是塔里木盆地形成深埋优质储层的主要原因,并通过对比研究我国东部和西部盆地在砂岩成岩作用特征上的差异进一步论证了这一观点(1995)。寿建峰、朱国华等(1998)指出地温场在砂岩成岩和孔隙演化中起着十分重要的作用,它不仅加快砂岩的化学成岩作用,而且大大加速了砂岩的成岩压实作用,提出了热压实作用效应的概念(寿建峰,2002),并建立了岩屑砂岩类孔隙度以及砂岩孔渗有效率的定量预测模型。这些认识可以反映正常或连续型埋藏成岩作用的特征。朱国华、寿建峰(1998,1999)在研究库车坳陷下侏罗统和吐哈盆地前侏罗系砂岩的成岩现象时进一步提出砂岩成岩作用和孔隙演化不仅与垂向上的地质作用有关,还受水平地质作用的控制,包括盆内和盆外传递于盆内的构造侧向作用。这种作用与盆山的构造耦合有很大关系,并且在时空上表现出较强的分异性,如库车坳陷和吐哈盆地,晚期侧向构造挤压在不同地区其构造变形强度可以差异很大,同一地区的不同构造层所经受的构造挤压变形也可以有变化,从而对砂岩的成岩压实产生不同的影响。在此基础上,寿建峰等(2002、2003)进一步总结了受构造应力成因控制的砂岩成岩模式的特征,并建立了构造应力与其减孔量的定量关系。在研究吐哈盆地前侏罗系储层性质控制因素时,寿建峰等(1999)还进一步认识到构造变形方式对砂岩储层也有重要的控制作用,这一认识的提出为西部地区大型构造推覆体下寻找良好储层提供了认识基础。经过近几年的研究,寿建峰等(1999、2000、2001、2003)提出砂岩的成岩作用是盆地演化过程中在内外动力地质作用下,岩石、热流、流体和构造活动综合作用的产物,它们从不同的作用方式、作用过程和作用强度给砂岩成岩作用施加影响,而单纯的埋藏深度或地层温度并不总能反映砂岩的成岩作用特征。

第三节 研究方法概述

砂岩储集体沉积后,其成岩作用和孔隙演化受到两大方面地质作用的控制(图1-1)。一为砂岩自身的物质特征(即成岩物质),它对砂岩的成岩作用和孔隙演化施加影响的主要因素

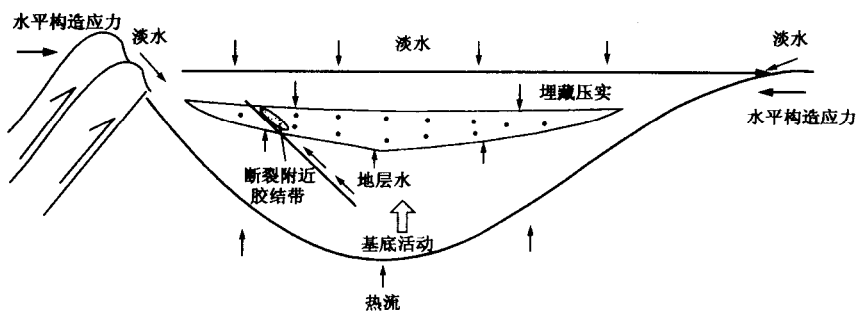


图 1-1 动力成岩作用参量示意图

为砂岩成分成熟度、结构成熟度和粒径等。其中,岩矿成分成熟度主要指砂岩的岩矿组成。由于我国含油气盆地中储层的岩石类型主要为岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,因此,对成岩作用影响更为重要的是岩屑成分的组成(这里称之为岩屑成分成熟度)。结构成熟度主要指砂岩的分选性和泥质含量。二为砂岩所处的地质背景或盆地动力学环境,诸如盆地的地热场、流体性质及其与岩石的相互作用(地层水和大气渗入水等)、埋藏热演化轨迹和构造变形作用等。

盆地的动力学特性自沉积物堆积后就始终作用于岩石(这里指碎屑岩储层),改变着岩石的体积和物理、化学性质,也决定着这些岩石最终能否成为油气储集体。这个成岩系统十分复杂,包含了岩石的物理性质、盆地流体、盆地热流、盆山耦合以及盆地内的构造活动等因素对岩石的各种作用,也包含系统内物质的转化、传输、沉淀、溶解以及系统内外物质和能量的交换等等。它们从不同的作用方式和不同的作用强度控制或影响着岩石的成岩演化途径和速率。这里称之为动力成岩系统(Dynamic Diagenesis System, DDS),其构成如图 1-2 所示,它可以表达为:

$$DDS = f(Ti, Sm, Mt, Th, Fl, St)$$

式中, Ti, Sm, Mt, Th, Fl, St 是 DDS 的构成要素,称之为成岩子系统。各符号含义见图 1-2。

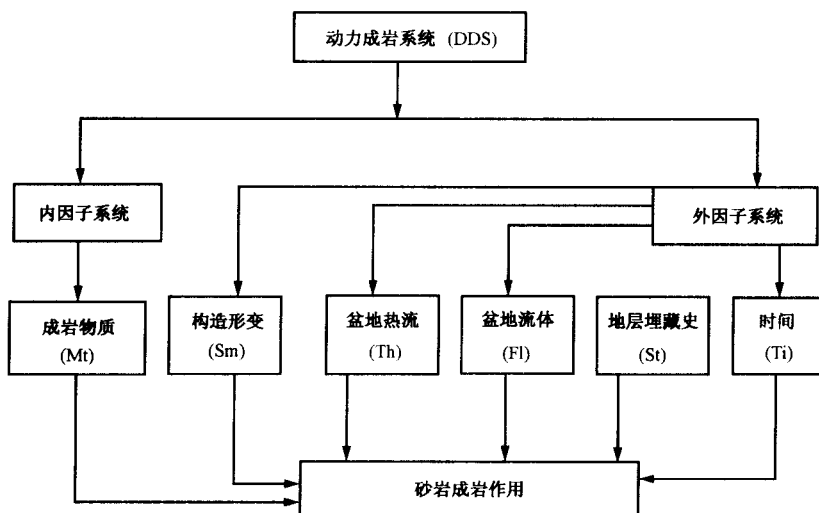


图 1-2 砂岩动力成岩系统的结构要素

盆地是一个地球动力学整体,因此从盆地动力学角度去观察大尺度成岩作用的系统结果,就为揭示盆地的成岩—成矿(油气)序列和时空结构提供了一个重要途径(孙永传等,1996)。这里研究砂岩的动力成岩系统是将砂岩的成岩作用(尤其是成岩压实作用)置于盆地的动力演化系统中,研究一定成岩物质的砂岩成岩作用与盆地动力学特征的联系性,揭示时空上砂岩成岩作用和孔隙演化的规律,建立成岩演化模式和孔隙度定量地质预测模型,达到钻前定量预测砂岩的成岩演化和储集性质。

砂岩动力成岩系统由内因子系统和外因子系统组成。内因子系统指岩石的成岩物质(Mt)特征,它是影响成岩作用的内在因素。这里主要指岩石在成岩过程中所表现出来的抗压性和抗热性的程度,可以用岩矿成分成熟度、岩屑成分成熟度和岩石结构成熟度等参量加以表示。外因子系统指作用于岩石并使其发生各种成岩变化的外在水素,包括构造变形(Sm)、盆地热流(Th)、盆地流体(Fl)、热演化轨迹(St)和地质作用时间(Ti)。对一定的成岩物质,外因子系统决定了成岩演化的途径和速率。

时间域或空间域上的动力成岩作用的性质、规模和对砂岩储集性质的控制程度是有很大差异的。这种差异是由各个成岩子系统的作用范围、方式和强度造成的。每个子系统都对大系统产生贡献,只是其贡献的大小和作用的方式不同而已,如时间与成岩压实的关系一般为线性关系,地层温度则为指数关系。而相对于地层温度而言,地温梯度或盆地热流起到了加速度的作用;构造变形可以在短时间内改变岩石的压实程度或孔隙体积,使成岩演化阶段呈现为递进性和突变性。因此,子系统与大系统之间的关系是局部与整体的关系,要认识大系统需要从研究子系统的作用方式和贡献大小开始;在研究子系统成岩特征的基础上,要从大系统的角度进行归纳。但是要建立大系统与所有子系统之间确定的关系也是比较困难的,这种困难是由地质上的诸多不确定性或现有技术手段的限制所造成的。由于胶结作用和溶蚀作用具有更大的多变性,同时考虑到它对储集性质的影响从整体上而言相对较小,为此,在研究这种关系时,我们更强调的是成岩子系统与成岩压实作用之间的关系。

砂岩的成岩物质是决定砂岩动力成岩特征的内在因素或基本要素,它对动力成岩作用的影响主要表现在岩石的抗压性、抗热性和化学反应的活动性方面。在大多数情况下,前两者显得更为重要,可以用岩矿成分成熟度、岩屑成分成熟度和岩石结构成熟度(杂基和粒径)表示。时间本身并不直接作用于成岩反应,但任何成岩作用都是在一定的时间内完成的,所以,在成岩作用研究中考虑时间因素是必要的(Scherer等,1987;朱国华等,1986;寿建峰等,2000)。其余4个因素是决定动力成岩特征的外在水素,对一定成岩物质的砂岩而言,它们规定了成岩作用的反应速率和演化途径。在分别研究这4个因素的作用的基础上,可以将它们分为3类作用方式进行研究:①盆地热流、盆地构造活动(沉降与隆升),结合时间因素,可以用热成熟度的概念研究与砂岩成岩压实之间的定量关系。②盆地构造形变作用对砂岩压实作用的影响是明显的,在挤压性盆地中,构造侧向挤压可以使砂岩的孔隙体积在相对短的时间内产生明显的变化。因此,需要研究盆地的构造变形强度、变形方式和变形时间与砂岩成岩作用之间的关系,必要时应做定向岩石样品的岩石力学性质测试或高压物理模拟实验。③盆地流体对岩石成岩作用的影响是十分普遍的,化学成岩反应是在流体参与下完成的。它也影响着岩石的物理性质或物理化学性质,改变岩石的抗压(抗剪)强度,高孔隙流体压力还减缓了压实作用的进程。因此,要研究盆地中流体的性质、流体的作用方式以及流体对成岩系统中物质的迁移和岩石成岩演化的控制作用。尽管流体及其与岩石的相互作用正日益受到许多地质学家的重视,但要建立流体作用与砂岩成岩演化之间的确切关系还有许多困难;同时,对含油砂岩孔隙

的增加或减少而言,流体作用的影响规模还需要进行深入的研究。

上述各个子系统都可以对动力成岩系统产生贡献,但其贡献的大小可以不同,这取决于每个子系统的特性和一定的地质背景。所以,研究特定地质条件下的关键子系统的贡献大小对于认识砂岩成岩和孔隙演化的机制是十分重要的。从这个角度考虑,这里主要讨论上述第一、二类的作用方式和机制。

第二章 成岩作用的地质背景和物质基础

我国北方地区含油气盆地的类型较多,发育有克拉通内拗陷盆地、前陆盆地(复合前陆盆地)、碰撞造山带内盆地和陆内裂谷盆地等。每类盆地的性质和演变过程有很大的差异,尤其中西部地区的含油气盆地更为复杂,表现为叠合盆地性质,如区域构造背景、古气候条件、物源性质、盆地热体制、盆地构造演化和沉积环境等均表现出较大的变化。这些变化给含油气盆地中的沉积物充填、成岩演化和储层性质带来较大影响,最终导致了成岩类型的多样性、成岩演化的多向性和成岩机制的复杂性。然而在统一的“成岩动力机制”作用下,它们之间也有着可以对比的相似性。

第一节 典型盆地的沉积地质背景

一、陆内裂谷盆地

我国东部地区自中、新生代以来,由于太平洋板块向欧亚板块俯冲,产生地幔热对流运动,导致北部地区岩石圈引张破裂,形成多旋回、大规模的陆内裂谷盆地(薛叔浩、刘雯林等,2002)。受裂谷盆地性质和演化的控制,其古地温梯度较高,不同演化时期的古地温梯度有变化。裂谷盆地演化的早期和后裂谷时期的古地温梯度一般介于 $3.0 \sim 4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,而在深陷期则大于 $3.4 \sim 4.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

陆内裂谷盆地的重要特征是以切割岩石圈不同深度的断裂为边界,由断裂分割的断块相对运动形成隆拗、凸凹相间的构造格局(薛叔浩、刘雯林等,2002)。内部大多是由不同尺度、不同层次的犁式断裂组成的不对称地堑、半地堑或箕状断陷(马杏垣,引自孙永传等,1996),其中以单断箕状断陷为主,如我国的渤海湾盆地(图2-1)。这种不平衡的块断运动对砂岩的成岩演化是有影响的。

陆内裂谷盆地的发生和发展一般经历了前裂谷褶皱—隆起期、同裂谷伸展断陷期和后裂谷拗陷期(高瑞琪、赵政璋等,2001)。其中,同裂谷伸展断陷期是裂谷盆地演化中最重要的演化时期,其充填过程可分为4期:①初陷扩张期以陆相杂色碎屑岩与玄武岩夹层为主;②裂陷强烈期为湖盆深陷期,湖盆的沉降幅度大,沉积速率也较高。在半深湖和深湖背景上充填了以扇三角洲、重力流、滨浅湖滩坝和以河控三角洲为特征的厚度较大的碎屑岩,局部地区夹膏盐岩和天然碱等;③裂陷收缩期为湖盆演化的退缩期,湖盆的沉降速率变小,水体变浅,充填的沉积物粒度变粗,以滨浅湖背景上的扇三角洲、河流三角洲和冲积平原沉积为主;④裂陷衰亡期为湖盆在岩石圈冷却、弹塑性回降情况下,湖盆在重力作用下走向衰亡的过程,对应于后裂谷阶段,充填一套厚度较稳定的类磨拉石沉积物。上述4个演化过程中,裂陷强烈期的充填物是最重要的含油气储集体,因为主要烃源岩和相当一部分的油气储集体均为该期充填而成。

在裂谷盆地中,扇三角洲、河控三角洲和湖底扇是最有代表性的沉积体系和储集体类型。油气储集体分布的一般特点是在同裂谷伸展断陷期的断陷陡坡带发育近岸湖底扇储集体,缓坡带为远岸湖底扇、河控三角洲和扇三角洲储集体,断陷长轴方向为沟道型重力流储集体(薛