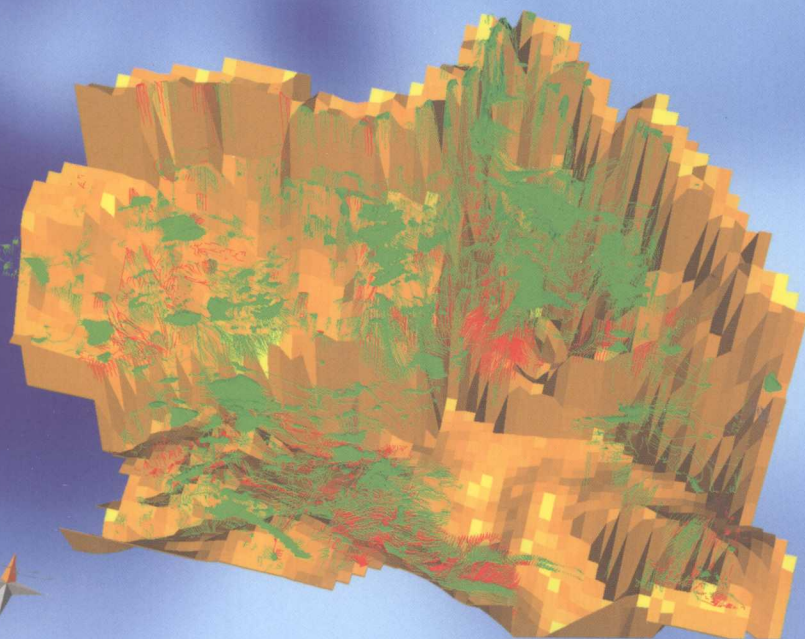


断陷盆地油气成藏动力学 与含油气系统表征

——以渤海湾盆地南堡凹陷为例

周海民 丛良滋 董月霞 王方正 王 华 著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

断陷盆地油气成藏动力学 与含油气系统表征

——以渤海湾盆地南堡凹陷为例

周海民 丛良滋 董月霞 王方正 王 华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书首先较系统地阐述了断陷盆地油气成藏动力学和含油气系统表征的综合研究技术,然后,以渤海湾盆地南堡凹陷为例,对盆地岩浆动力学演化、盆地沉降与伸展演化、盆地油气成藏能量场演化、含油气系统静态和动态特征进行了全面研究,并从油气聚集规律和油气勘探实践的角度,对油气成藏动力学与含油气系统表征基础研究工作的意义进行了分析。全书基础资料翔实,内容丰富,图文并茂,具有很强的科学性、创新性和实用性,对断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统研究具有很好的指导作用。

本书可供高等石油院校和研究院所的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征:以渤海湾盆地南堡凹陷为例/周海民等著. —北京:石油工业出版社, 2005.8

ISBN 7-5021-5134-6

I. 断…

II. 周…

III. ①渤海湾—断陷盆地—油气藏—动力学—研究

②渤海湾—断陷盆地—油气藏—分布规律—研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 074902 号

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.com.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.5

字数: 291 千字 印数: 1—1000 册

定价: 98.00 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

序

南堡凹陷面积 1932 平方千米, 其中陆地面积 570 平方千米, 滩海、浅海面积 1362 平方千米。它位于渤海湾盆地黄骅拗陷北端, 唐山市南, 紧邻东西走向的燕山隆褶带南缘。北面为柏各庄和西南庄大断裂, 南面与沙垒田凸起呈断超式接触, 是一个下第三系箕状含油气凹陷。

20 世纪 60—80 年代, 南堡凹陷由大港石油管理局进行勘探开发。1964 年钻探南 1 井和南 2 井, 发现一些油气显示。70 年代经二维地震勘探, 解释出高尚堡、柳赞、老爷庙和北堡等有利圈闭。1979 年南 27 井钻探下第三系沙三段获工业油流, 发现高尚堡油田。1980 年柳 1 井在沙三段亦获工业油流, 发现柳赞油田。随即将这两个油田先后投入开发。1988 年成立冀东石油勘探开发公司, 将南堡凹陷的勘探开发工作从大港石油管理局分离出来, 当时石油年产量为 18 万吨。冀东石油勘探开发公司在技术上得到了北京石油勘探开发研究院的支持。公司自己亦成立了研究所(院), 大大增强了自主创新的实力。先后发现 9 个油气田, 开发了其中 6 个油田。1995 年石油产量达到 50 万吨。1997—2002 年保持年产油量 60 ~ 65 万吨的水平。并在 2003 年产油量达到 75 万吨, 2004 年突破 100 万吨水平, 公司进入了增储上产的持续发展局面。

南堡凹陷滩海、浅海面积比陆地大, 处于生烃中心地区, 石油地质条件优越。1994 年第二轮对外合作招标时, 曾将老堡和蛤坨两个滩海区块交由美国 Kerr-McGee 公司进行风险勘探, 后又将北堡西滩海区块交由意大利 Agip 公司进行风险勘探。Kerr-McGee 公司曾对老堡和蛤坨地区做了二维地震, Agip 公司曾对北堡西做了三维地震。先后完钻 3 口预探井: 老海 1 井、坨海 1 井和北堡西 1 井, 均未获工业油气流。2002 年两外国公司退还这些合作区块, 遂由冀东石油勘探开发公司进行自营勘探开发。继而冀东油田又进行三维连片测量 2400 平方千米, 解释南堡滩海、浅海地区发育有 5 个构造带: 南堡 1 号、南堡 2 号为古生界潜山和第三系披覆构造带; 南堡 3 号、南堡 4 号和南堡 5 号为第三系断背斜或断鼻构造带。2004 年, 在南堡 2 号构造带所钻的老堡南 1 井、老堡 1 井和在南堡 1 号构造带所钻的南堡 1 井, 在奥陶系潜山油藏或第三系东一段至馆陶组中浅层油藏测试均获得高产油气流, 预示着南堡滩海、浅海地区勘探开发的光明前景。

由周海民、丛良滋、董月霞、王方正、王华等著的《断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征——以渤海湾盆地南堡凹陷为例》一书即将与读者见面。

该书代表了进入新世纪的冀东油田在自主创新提高阶段的精细勘探开发技术水平。该书作者都是长期在冀东油田工作的专家，他们既具有含油气系统、层序地层学与油气成藏动力学方面的理论素养，又具有丰富的生产实践经验，对复杂断块油田能反复认识，攻坚啃硬，长于解释，巧于布井，推动了南堡凹陷不同类型复式油气聚集（区）带的滚动勘探开发进程。他们在该书中将烃源岩、储集岩、圈闭形式、运移—聚集途径和时间等匹配关系联系起来，进行全凹陷陆、海三维油气运聚动态特征解释，图文并茂。该书对黄骅坳陷同类型的下第三系小型箕状含油气凹陷和断块油田的勘探开发有重要的参考价值，对高等石油院校和科研院所的科技工作者也是一本值得仔细阅读的好书。

中国科学院院士

李德生

2005年6月

前 言

油气藏分布规律研究始终是油气勘探工作最核心的研究课题,与此相关的研究技术也处于不断完善的过程中。20世纪80年代以前,勘探家对油气藏分布规律的研究主要立足于静态的描述手段。自80年代以来,有关盆地动力学演化、盆地沉积充填过程、盆地构造运动学、油气成藏机理、盆地数值模拟与含油气系统表征等诸多领域的研究技术与手段都取得了长足的进展。依托于上述新技术的不断发展和各学科间交流与渗透的不断加强,石油地质研究领域出现两大新的亮点:一是形成了以揭示油气成藏内在形成机制的新学科——油气成藏动力学,这一学科是石油地质学与地球动力学相结合的一门新兴边缘学科,并正成为石油地质学家和油气勘探家所热衷的一个新的研究方向;二是含油气系统研究技术随着动态表征技术的不断提高也得到很大发展,尤其在较高勘探程度地区,它对潜在隐蔽油气藏的勘探正发挥着越来越大的作用。上述两大方面技术的有机结合不仅有助于油气勘探家更好地把握油气成藏与分布的规律,而且对指导油气勘探的实践也具有十分重要的现实意义。

渤海湾盆地南堡凹陷是一个小凹陷,也是一个地质条件极其复杂的老探区。近年来,南堡凹陷的油气勘探工作十分活跃。这不仅表现在油气勘探取得了明显的进展,原油产量由1995年的50万吨上升到2004年的100万吨,并有可能突破300万吨,各项先进的石油类技术包括物探技术、地质综合研究技术和各项油田工程技术得到了广泛的应用。而且通过新一轮的研究工作,人们对本区的石油地质认识也取得了新的突破,油气成藏动力学与含油气系统表征技术即是该区近年来众多研究技术系列的一个方面。此项研究技术不仅对南堡凹陷的油气勘探工作具有重要的指导意义,而且对中国东部类似的断陷盆地研究工作也具有重要的参考价值。

本书以周海民的博士论文成果和南堡凹陷油气成藏动力学三维模拟为基础,结合近年来南堡凹陷油气勘探的实践编写而成。本书重点总结了油气成藏动力学、热动力学研究的最新成果,并与含油气系统概述结合,探讨了油气成藏过程和油气分布规律,并着力将研究成果和认识紧密结合当前该探区大规模的油气勘探实践,这也是本书的特色。

全书共分为九章,由周海民统编,包括详细编写要求和编著重点。第一章由丛良滋执笔,第二章由周海民、董月霞执笔,第三章由王方正、周海民执笔,第四章由王华、周海民执笔,第五章由丛良滋执笔,第六章由周海民执笔,第七章由丛良滋执笔,第八章、第九章由周海民、董月霞执笔。

在本书的后期制作过程中还得到了麻翠杰、黄红祥的帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

由于本书作者水平和经验有限，对油气成藏动力学和含油气系统等前沿技术的认识与理解可能有不妥之处，敬请批评指正。

著者

2005 年 5 月

目 录

第一章 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征技术	(1)
第一节 断陷盆地油气成藏动力学研究技术	(1)
第二节 断陷盆地含油气系统表征技术	(6)
第二章 南堡凹陷基本地质概况	(10)
第一节 区域地理位置	(10)
第二节 结构特征	(10)
第三节 沉积充填特征	(12)
第四节 基本石油地质特征	(15)
第三章 南堡凹陷岩浆动力学研究	(17)
第一节 火成岩地质概况	(17)
第二节 火成岩岩石学特征	(19)
第三节 岩浆作用与盆地热事件	(29)
第四节 岩浆活动与南堡凹陷的裂陷作用	(34)
第四章 南堡凹陷沉降与伸展分析	(40)
第一节 沉降速率分析的原理和方法	(40)
第二节 第三系地层沉降速率特征分析	(42)
第三节 岩石圈伸展系数与热状态分析	(65)
第五章 南堡凹陷油气成藏能量场演化	(69)
第一节 含油气系统数字化模型建立	(69)
第二节 生烃动力学特征	(75)
第三节 烃源岩排烃动力学特征	(78)
第四节 油气运聚动力学特征	(84)
第六章 南堡凹陷含油气系统研究	(89)
第一节 含油气系统基本地质要素	(89)
第二节 含油气系统的划分与描述	(129)
第七章 南堡凹陷油气成藏动态表征	(145)
第一节 盆地充填及构造演化动态表征	(145)
第二节 烃源岩生排烃动态表征	(149)
第三节 油气运聚动态表征	(151)
第四节 资源潜力分析	(152)
第八章 南堡凹陷油气聚集规律浅析	(154)
第一节 三个构造层的基本石油地质特征	(154)
第二节 二级构造带描述	(158)
第九章 油气成藏动力学与含油气系统表征研究对南堡凹陷油气勘探的指导意义	(162)

第一节	油气成藏动力学研究对油气勘探的指导意义	(162)
第二节	含油气系统研究对油气勘探的指导意义	(163)
第三节	热动力学研究对油气勘探的指导意义	(164)
第四节	盆地演化各要素之间的耦合关系	(165)
第五节	油气勘探潜力分析与勘探效果	(167)
参考文献		(169)

第一章 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征技术

断陷盆地是中国东部含油气盆地很重要的盆地构造类型,40 余年来,广大石油地质工作者对该类型盆地的油气藏形成机制和油气分布规律研究进行了不懈的探索,发展形成了一系列独具特色的中国陆相断陷盆地石油地质理论,为中国石油工业的发展做出了重要贡献。然而,由于受历史研究技术条件所限,传统的石油地质研究成果都以油气藏分布的静态描述为特点。自 20 世纪 80 年代以来,盆地动力学、盆地沉积充填过程、盆地构造运动学、油气成藏机理、盆地数值模拟、含油气系统表征等相关研究领域和研究技术都取得了长足的发展。随着学科间交流的不断加强,一种以揭示油气成藏内在机制、由石油地质学与地球动力学相结合的一门新兴边缘学科——油气成藏动力学应运而生。由于油气成藏动力学是以揭示油气分布规律的内在动力为研究内容,因而,它正成为石油地质学家和油气勘探家所热衷的一个新的研究方向。含油气系统研究技术是一项石油地质综合研究表征技术,该项技术从 20 世纪 90 年代以来得到很大发展,尤其各种动态恢复研究技术的融入使含油气系统表征技术跨入了一个新的阶段。油气成藏动力学与含油气系统表征技术的有机结合,不仅有助于石油地质家探讨油气成藏的内在动力,而且可以更加生动、直观地刻画油气藏的地下分布规律,为指导油气勘探实践奠定良好的基础。

第一节 断陷盆地油气成藏动力学研究技术

在一个沉积盆地中,对油气的生成、圈闭和保存起重要作用的因素不仅有烃源岩、储集层和盖层,而且包括沉积体中的所有因素(Perrodon 和 Masse, 1984)。尽管包括温度场、压力场和应力场的能量场(张厚福, 1998)是油气藏形成的直接动力源泉,但由于能量场的形成演化过程依托于沉积盆地的形成演化过程,因此,要全面揭示油气藏形成演化的动力学特征必须从盆地的动力学演化特征入手,并进一步研究油气藏形成的直接动力学特征,即能量场特征。

以盆地动力学为基础的断陷盆地油气成藏动力学研究技术概括而言,可包括四个方面,即盆地热动力学研究技术、盆地伸展作用研究技术、盆地沉降作用研究技术和盆地能量场研究技术。

一、热动力学研究技术

由于烃源岩的成熟过程、油气有机相的性质、分布特征及其储运条件受控于盆地热状态演化过程,因此,盆地热动力学研究是油气成藏动力学研究的一项重要内容。盆地底部的热供应,即热流主要来自于上地幔和下地壳两个方面,其中下地壳的热源主要起因于放射性元素的衰变;而上地幔的热源则归因于地球的冷却作用。现代物理学认为,

热传递的方式主要有三种,即传导、对流和辐射。对下地壳和上地幔向盆地内部的供热方式目前尚存在很大争议,但辐射方式是公认可以排除的,问题在于传导和对流对各沉积盆地在多大程度上发挥作用。目前的倾向认识是,传导对多数盆地的热供应是重要的,对流只伴随流体的运动,如岩浆和热液作用而发生传递。作为张性盆地的一种很重要的构造类型,断陷盆地的演化过程通常伴有多期的岩浆热事件发生,这对了解盆地演化的深部动力学特征创造了十分有利的条件。目前,断陷盆地热动力学研究所采用的技术主要有火成岩岩石学研究技术和盆地热动力学演化的物理模拟技术。

1. 火成岩岩石学研究技术

由于岩浆作用的动力及原始组成均起源于地球深部地质作用,因而其产物——盆地中的岩浆岩不仅是联系地球表层及深部的纽带,而且是人们了解地球深部地质作用的直接窗口和分析盆地演化动力学机制的最可靠基础。火成岩岩石学研究技术主要通过对研究区火成岩的分布、火成岩岩石化学常量、微量及稀土元素特征的研究,探讨岩浆的起源及其演化特征,揭示岩浆作用与盆地演化的动态耦合关系,并进一步了解盆地的热动力学过程与盆地沉降、沉积及烃源岩热演化的内在关系。

2. 盆地热动力学演化的物理模拟技术

盆地热动力学演化的物理模拟技术是以相似性原理为基础,选择适宜的实验材料,通过一定的实验装置,物理地再现盆地演化的热动力过程。其意义在于人们可通过物理过程的再现,验证各种可能的地质演化过程,了解地质现象的物理渐变规律,分析油气成藏的潜在机理。为探讨断陷盆地形成机制,笔者曾通过物理模拟技术较成功地再现了南堡和北塘凹陷的软流圈脉动性上涌的地质演化过程(周海民等,2001)。

二、伸展作用研究技术

断陷盆地无论属主动裂谷还是被动裂谷(Brock, 1970; Burke 和 Wilson, 1972; Hinze 等, 1972; Burke 和 Dewey, 1973; Donaldson 和 Irving, 1972; Chase 和 Glimmer 1973; Sengor 和 Burke, 1978; Baker 和 Morgan, 1981),伸展作用都是其一种共同的构造演化机制,它是断陷盆地在不同地质时期沿水平方向的应变效应。目前,伸展作用研究技术已成为断陷盆地构造运动学研究的一种常规研究手段,其实现方法是在构造恢复研究技术的基础上,通过对不同地质时期伸展量的计算,确定断陷盆地构造演化的总体和动态伸展特征。其常用的计算方法如下:

$$E=L_1-L_0 \quad (1-1)$$

$$Ext=[(L_1-L_0)/L_0] \times 100 \quad (1-2)$$

$$\beta=L_1/L_0 \quad (1-3)$$

$$R=(L_1-L_0)/\Delta t \quad (1-4)$$

式中 E 、 Ext 、 β 、 R ——分别代表伸展量、伸展率(%)、伸展系数和递进伸展量;
 L_0 、 L_1 ——分别指拉张前、后的剖面长度;
 Δt ——某地质时期的时间间隔值。

三、沉降作用研究技术

盆地沉降包括沉积负荷沉降和构造沉降。前者是沉积物负荷的均衡效应,后者是深

部地球动力学作用（热冷却、地幔隆升、岩浆底辟、地壳拆沉等）和构造环境所施加影响（伸展、挤压或走滑等）的综合反映。因此，构造沉降变化体现出地球动力学环境的演变，具有丰富的地球动力学信息。目前，沉降研究技术亦成为盆地分析的一种常规研究手段。盆地总沉降量 Y_s 可按下式计算（Allen, 1990）。

$$Y_s = \frac{y_1 \left[(\rho_m^* - \rho_c^*) \frac{y_c}{y_1} \left(1 - \alpha_v \frac{T_m y_c}{2 y_1} \right) - \frac{\alpha_v T_m \rho_m^*}{2} \right] \left(1 - \frac{1}{\beta} \right)}{\rho_m^* (1 - \alpha_v T_m) - \rho_s} \quad (1-5)$$

式中 y_1 ——岩石圈初始厚度，m；
 y_c ——地壳初始厚度，m；
 ρ_m^* ——0℃时地幔密度，kg/m³；
 ρ_c^* ——0℃时地壳密度，kg/m³；
 ρ_s ——充填在盆地中沉积物或水的密度，kg/m³；
 α_v ——地壳及地幔的热膨胀系数，1/℃；
 T_m ——软流圈温度，℃。

盆地构造沉降量可按式计算（Bond 和 Kominz, 1984；Allen, 1990）：

$$Y(t) = F(z, t) \left[S \frac{\rho_m - \bar{\rho}_s(t)}{\rho_m - \rho_w} - \Delta SL(t) \frac{\rho_w}{\rho_m - \rho_w} \right] + [W_d(t) - \Delta SL(t)] \quad (1-6)$$

式中 $Y(t)$ ——盆地某地质时刻构造沉降量，m；
 $F(z, t)$ ——基底对负荷的响应函数，艾里均衡时， $F=1$ ；
 S ——回剥计算后的地层厚度，m；
 $\Delta SL(t)$ ——相对现今海平面的海平面变化值，m；
 $W_d(t)$ ——沉积时的古水深，m；
 ρ_m ——地幔密度，kg/m³；
 $\bar{\rho}_s(t)$ ——沉积层的平均密度，kg/m³；
 ρ_w ——水体密度，kg/m³。

四、能量场研究技术

油气生成、运移和聚集为一时空连续过程，该过程涉及盆地漫长演化进程中的一系列复杂的、动态的、多种地质作用（Welte 和 Yalçın, 1988），这些地质作用由盆地演化过程中物理条件（PVTX）的渐进变化引起，并被其逐渐推动（H.S.Poelchau, D.R.Baker 等, 1997）。然而，在油气自生成至运聚的漫长地质演化过程中，各阶段的内在动力机制有着显著的差别。在油气的生成阶段，古温度场演化发挥着十分重要的作用；在油气排烃阶段，烃源体内部的古压力场构成及演化、烃类流体在烃源体内部的浓度梯度特征是油气排烃的直接动力；在油气运聚阶段，流体势的分布则决定着油气的主要运移指向和有利的油气富集部位。

1. 盆地地温场研究技术

地球深部热源通过盆地底部传递至盆地之中，并通过导热率不同的岩石在盆地中进行热的扩散，并以场的形式作用于盆地之中的地质体，即为盆地的地温场。对于现今地

温场,人们可以通过钻井井温测量和大地热流值测量来进行研究,然而,对于古地温场,人们无法真正了解盆地在不同地质时刻的准确热动力学参数特征,而只能通过盆地热动力学演化所产生的各种效应(镜质组反射率、孢子颜色和热变指数、自生矿物演化特征、磷灰石裂变径迹、包裹体测温等)来追溯其变化特征,并通过盆地模拟技术或含油气系统模拟技术动态恢复古地温场的变化特征。

2. 盆地地压场研究技术

地层状态下压力场是多种作用过程的结果,上覆地层的负荷作用、粘土矿物转化、有机质生烃、外部应力传导等都可以使地压场的特征发生变化。很久以来,石油地质家对地压场在油气排运过程中的作用了解得较为清楚。近年来的最新研究结果表明,异常地层压力同样有可能对油气的生烃过程产生重要的影响,因此,地压场研究具有更为重要的理论与实践意义。对现今地压场特征,人们可以通过现场的测井和测试方法进行研究;对古地压场,则可以通过古流体测压技术和压力恢复物理及数值模拟技术进行研究。

3. 盆地地应力场研究技术

地壳或地球体内,应力状态随空间点的变化,称为地应力场(张厚福等,1999)。对成藏动力学研究而言,古地应力研究则是地应力场研究的主要内容。目前该领域的研究技术带有很大程度的探索性,主要手段包括由现场应变测量反演应力场、构造应力恢复物理及数值模拟技术、平衡构造恢复确定古应力场等。

4. 盆地流体势研究技术

流体势是油气二次运移的综合动力表征。油气在连续运移状态下,流体与其周围环境的相互作用是通过流体势梯度确定的,流体速度及其流动方向可由流体势梯度直接导出。流速的线性形式可通过单相态的达西定律表达出来。对多相态的表达方式,可通过对达西定律进行适当扩展来实现,即在描述某单相流体的运动时,可将流体的其他相态假定为岩石固体骨架的一部分。因此,流体的相对渗透率可看作是其饱和度的函数。需要指出,当流体流动过程中,不同相态的流体之间发生明显的相互作用时,上述近似的假设是不成立的。

调整后的多相态达西定律可表达如下:

$$v_i^f = -\frac{K_{ij} \cdot K^f}{\mu^f} \cdot \partial_j U^f \quad (1-7)$$

式中 v_i^f ——流体相速度;
 K_{ij} ——渗透率张量;
 K^f ——流体相的相对渗透率;
 μ^f ——流体相粘度;
 U^f ——流体势。

上式说明,流体势可看作是油气运移的动力,但运移的特征同样受流体的相对渗透率和粘度所影响,当流体在地层中的浓度减小时,其流动速度将趋近于零,流体的相对渗透率在很大程度上取决于其饱和度值。

流体流动样式的另一项很重要的参数是其饱和度门限值。如果石油初始运移的饱和度门限值相对较高(5%~15%),则将发生脉冲式运移和石油带状运移;当该门限值相

对较低时,将导致油气的连续相运移。另外,在油气运移模拟过程中,指定的饱和度门限值针对的是比岩石孔隙大得多的模拟网格,因此,此门限值是一项总体值或平均值,应比局部的小尺度孔隙饱和度门限值(通常可达到20%~50%)小得多。

在油气运移模拟中,初始饱和度值对流体的总体流动速度,即油前缘的初始扩散速度,产生明显影响。在基本的受饱和度控制的排烃模型中,油气必须先将某网格充注达到初始饱和度值之后,方可向其邻近的网格发生连续运移。对厚度约几十米的薄层,较高初始饱和度值(大约20%)可能较为合适,但油气的运移方式很可能是脉冲式运移,而且沿运移路径,油气的饱和度会发生很大变化。低的初始饱和度值,如3%~5%,可能更接近于厚层的情况。由于此初始饱和度值相对较低,在油气发生连续性运移前,各网格并不需要太长的时间对其油气充注,由此,低的初始饱和度值往往造成流体流动的平均速度相对较高。

流体势(或流体异常高压)可通过孔隙的真实压力场和浮力场导出。

$$U^f = p^f - \rho^f g X_1 \quad (1-8)$$

式中 p^f ——流体压力;

ρ^f ——流体密度;

g ——重力加速度;

X_1 ——高程,轴指向垂直向下为正。

两种流体的孔隙压力差就是毛细管压力。在多孔介质中,毛细管压力主要受孔隙几何形态,特别是孔喉大小的影响。

最终流体势可用下式表达:

$$U^p = U^w + (\rho^w - \rho^p) g X_1 + p^{pc} \quad (1-9)$$

式中 U^p ——油气势;

U^w ——水势;

ρ^w ——水密度;

ρ^p ——油气密度;

p^{pc} ——毛细管压力。

由上述流体势表达式,可得出如下三点启示:①油气将由孔隙的高压区向低压区流动;②由于密度较低,油气将趋于向上垂直运移;③油气将由高毛细管压力区向低毛细管压力区运移。高毛细管压力区,如盖层将对油气运移产生阻碍,并可改变油气的运移方向和运移路径,或使油气发生聚集。

流体势研究技术,即油气二次运移动力学研究是含油气系统数值模拟技术的重要内容,也是近年来含油气系统数值模拟技术发展的一大亮点。

5. 含油气系统数值模拟技术在成藏动力学领域的最新进展

近年来,含油气系统模拟技术在成藏动力学领域主要有以下三方面进展:

(1) 油气运聚模拟技术是含油气系统模拟技术中最突出的一个发展方向。

20世纪70年代末至80年代,盆地埋藏史、二维盆地构造演化史、热史、油气生烃史及排烃史模拟技术不断发展,并趋势完善,但油气运聚史的模拟技术却相当薄弱;进入20世纪90年代以来,油气运聚模拟技术取得了长足的进展,并相继出现了可适用于不同条件下的油气运聚模拟技术,如可变温压下多组分多相态的达西定律运聚技术、基

于浮力的流线法运聚技术和前二者结合的组合油气运聚技术等。最先进的油气运聚模拟技术可使地质家在可接受的时间内从系统角度对油气生烃乃至成藏的全过程进行模拟研究。

(2) PVT 控制的多组分多相态技术有机地融入到含油气系统模拟技术之中。

油气在地下的组分及相态不仅可以对多烃源体系的油气来源进行示踪,而且也决定或影响油气的运移特征和油气田开采的驱动方式。烃源岩生烃动力学的丰富实验结果与 PVT 条件下组分和相态理论的有机结合对含油气系统模拟研究具有十分重要的意义。

(3) 三维模拟及可视化显示技术是含油气系统模拟技术最现代的发展方向。

在 20 世纪 90 年代以前,含油气系统模拟技术主要以揭示单井埋藏史、热史及生烃史一维模拟技术和揭示盆地骨干剖面埋藏史、热史、生排史及运聚史的二维模拟技术为特色。至 90 年代后期,随着计算机技术的迅猛发展,大容量计算逐渐成为可能,含油气系统三维模拟软件的开发工作已成为一种新的发展潮流,并且三维模拟技术与先进可视化显示技术的有机配合成为含油气系统模拟的全新发展方向。

第二节 断陷盆地含油气系统表征技术

自从 1972 年 W.G.Dow 首次从系统论的角度提出“石油系统”(oil system)的概念和 1994 年 L.B.Magoon, W.G.Dow 将“含油气系统”的概念进一步完善和发展以来,含油气系统的研究与评价已经成为有效预测和发现油气资源的重要工具。L.B.Magoon 和 W.G.Dow 所提出的“四图一表”含油气系统表征方法,即关键时刻埋藏史曲线图、关键时刻含油气系统平面分布图、关键时刻含油气系统要素空间展布的地质横剖面图、含油气系统事件图和含油气系统范围内发现和可能存在的油气聚集一览表,曾被国内外的广大石油地质工作者广泛采用。中国石油地质学家尽管不是最早在国际刊物上公开提出“含油气系统”等概念的先驱者,但其“成油系统”、“源控论”思想却自 20 世纪 60 年代以来一直指导着中国油气勘探工作的实践,与此相关的石油地质六大要素,即“生、储、盖、运、圈、保”也一直是石油地质描述研究的主要内容。

自 20 世纪 90 年代含油气系统的概念引入国内以来,广大石油地质研究工作者在充分吸取国外含油气系统描述技术的基础上,根据中国石油地质的特色,对含油气系统表征的内容及技术进行了不断的探索与发展(赵文智,何登发,1996;胡见义,1997;胡朝元,1997;赵文智,2003)。赵文智教授根据中国含油气系统的复杂性,提出了包括定源、定时、定向、定边界、定量及定级的“六定”评价途径与方法,并对含油气系统的描述内容、应完成的图件及具体描述方法进行了系统的阐述(表 1-1)。

上述含油气系统表征内容可概括为两个方面,一是含油气系统现今状态的静态描述;二是含油气系统形成演化的动态描述。前者是后者的基础,前者描述结果的准确程度将直接影响含油气系统最终描述结果的可靠性;后者的主要内容是含油气系统表征的过程重建工作。

表 1-1 含油气系统评价与方法 (据赵文智, 2003)

内 容	描 述 构 成	描 述 图 件	描 述 方 法
静态地质要求	有效烃源岩: 门限、层段、范围、潜力	① R_o-H 曲线; ② 海 (湖) 侵层序岩相图; ③ 有效烃源岩等厚图; ④ 生烃强度等值线图; ⑤ TTI 等值线图; ⑥ 关键时刻生烃事件剖面图	① 油 / 气—源对比法; ② 烃源岩潜力评价; ③ 海 (湖) 侵体系域圈定; ④ 剥蚀与埋藏史计算; ⑤ TTI 计算; ⑥ 古地温计算; ⑦ 测井生油评价; ⑧ 热模拟实验
	储集层: 岩相、岩性、几何形态、成岩作用	① 低位和高位体系域岩相图; ② 砂体几何形态图, 岩性—物性统计图; ③ 砂岩百分比等值线图; ④ 储集层成岩相划分图	① 层序地层学分析; ② 沉积相分析; ③ 储集层描述; ④ 实验室物性分析; ⑤ 成岩相分析
	输导层: 层、面、网	① 关键时刻输导层顶面埋深图; ② 同“储集层”①—③; ③ 断层与不整合面起伏形态图; ④ 裂缝与断层组合分布图	① 同“储集层”①—③; ② FMS、BHTV FMI 与 CBIL; ③ 砂岩百分比统计法; ④ 有限元法; ⑤ 断层与不整合面描述
	盖层: 区域性、局部性、质量	① 同“有效烃源岩”②; ② 盖层岩性变化图; ③ 盖层等厚图; ④ 破裂压力—岩性与厚度关系图; ⑤ 排替压力等值线图; ⑥ 剩余压力分布图	① 排替压力实验室分析; ② 同“有效烃源岩”③; ③ 同“储集层”③; ④ 同“输导层”④; ⑤ 测井地震剩余压力计算
动态地质要求	油气生成过程: 门限、高峰与结束对应的时间与有效范围, 延续时间与对应的生烃量	① 生烃门限、高峰与结束期烃源岩平面分布图; ② 烃源岩产烃率— R_o 图版; ③ 关键时刻生烃强度等值线图; ④ 不同阶段生烃量— R_o 关系图	① TTI 计算与成图; ② 生烃热模拟实验; ③ 古地温确定 (AFTA 法与流体包裹体法); ④ 烃源岩综合评价
	油气运移过程: 初次运移期与层段, 二次运移期流体势, 流体历史分析, 关键时刻输导层产状	① 关键时刻流体势等值线图; ② 关键时刻输导层产状、连续性平面变化图; ③ 关键时刻输导层成岩相; ④ 烃源岩 (ϕ , Δt)— H 曲线	① 流体历史分析; ② 流体热计算; ③ 三维构造恢复
	圈闭形成过程: 形成期、分布、几何体积和构成	① 圈闭发育图; ② 分期圈闭分布图; ③ 圈闭构成评价图; ④ 圈闭封闭性评价图	① 隐蔽圈闭描述; ② 同“油气运移过程”③; ③ 圈闭描述评价; ④ 储集层成岩分析
	油气藏形成过程: 汇聚区划分、汇聚量、成藏期确定	① 同“油气运移过程”①; ② 油气聚集区带划分图; ③ 分区带油气运聚量计算; ④ 同“圈闭形成过程”④	① 油藏地球化学; ② 同“油气运移过程”①、②; ③ 油气资源区带评价
要素及作用组合关系	关键时刻要素及作用组合关系; 含油气系统划分; 有利勘探靶区与目标	① 油气田、油气显示与空井平面分布图; ② 含油气系统事件组合图; ③ 关键时刻要素特征平面组合图; ④ 有利聚集区带划分评价图; ⑤ 有利含油气目标评价图; ⑥ 含油气系统剖面图; ⑦ 含油气系统平面分布图; ⑧ 勘探部署图	① 石油地质综合研究; ② 盆地模拟与含油气系统模拟; ③ 油气资源评价; ④ 经济评价; ⑤ 决策分析

一、含油气系统静态表征技术

含油气系统静态表征旨在对含油气系统基本要素(生、储、盖、上覆地层)及圈闭的空间展布和形态进行准确的描述。其表征工作所涉及的主要技术包括地震构造综合解释技术、层序地层研究技术、烃源岩表征技术、储集层预测研究技术、油藏地球化学研究技术、盖层表征技术等。

1. 地震构造综合解释技术

地震构造解释是含油气系统研究的基础。自20世纪90年代以来,地震解释技术在传统的基于单线解释基础之上产生了质的飞跃,大批先进技术如可视化技术、切片技术、多属性交互和联合解释技术、变速成图技术等得到不断引进和推广。多种解释技术的综合应用,可极大地提高地震构造解释的准确性和效率。

2. 层序地层研究技术

自20世纪90年代以来,层序地层学理论及其研究技术在国内经历了概念引进、创新与发展、不断推广应用的快速发展过程。实践证明,其理论与方法对油气勘探开发的不断深化具有十分重要的指导意义。对含油气系统静态描述而言,层序地层研究技术不仅可为后期的研究工作提供等时的地层框架模型,而且可为烃源区、储集区和盖层分布区的有效预测奠定良好的研究基础,对可能作为油气运移通道的区域不整合面(层序界面)的空间展布进行准确表征。

3. 烃源岩表征技术

烃源岩表征技术是综合应用层序地层学、沉积学、有机地球化学多学科先进技术及其分析测试结果,确定有效烃源岩的层系、分布范围、厚度变化规律、主要生烃参数(有机碳、氢指数等)的平面变化特征,建立烃源岩热演化参数数据库,并收集有关热压模拟实验和化学动力学的分析测试结果,为含油气系统生烃动态过程恢复奠定基础。

4. 储集层综合表征技术

储集层表征是含油气系统静态表征的一项十分关键的内容,其研究内容是对含油气系统储集体系的砂体空间展布、几何形态、相带展布、物性特征、成岩演化规律等进行系统的综合研究。自20世纪80年代以来,储集层综合表征技术无论在宏观预测方面,还是微观描述方面都取得了长足的进展,并成为油气勘探不可缺少的综合研究技术。

5. 油藏地球化学综合研究技术

油藏地球化学研究技术是20世纪80年代末逐渐兴起的一系列综合研究技术,包括储集层自生矿物生长研究技术、流体组分及温压测试技术、固体沥青分析测试技术、薄层色谱—氢离子火焰检测技术(TLC-FID)、热蒸发色谱技术(TD-DC)、残余盐分析技术(RSD)等。已有的油藏地球化学综合研究技术对揭示油气成藏期、油气运移路径、油气运移过程具有十分重要的意义。

6. 盖层表征技术

目前对盖层的表征技术可概括为两个方面,一是传统的石油地质定性表征技术,其描述的内容是区域盖层和局部盖层的分布及厚度特征;二是实验分析定量表征技术,其描述的内容包括盖层的物性特征参数、孔径描述参数、压实特征参数、封盖特征参数、热传导特征参数等。