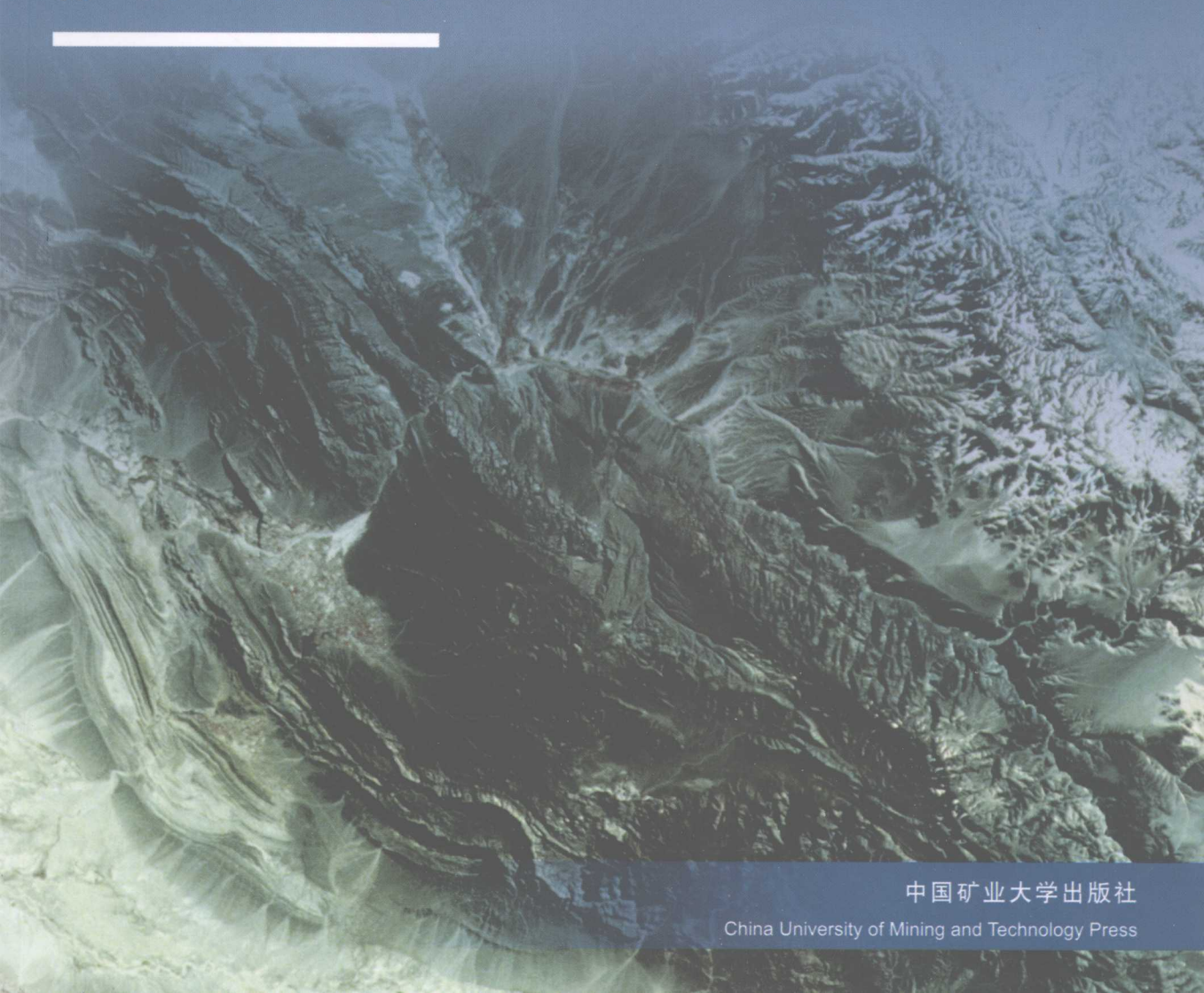


地下水与油气成藏

——以泌阳凹陷为例

Groundwater and Hydrocarbon Accumulation

符 勇 姜振泉 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

地下水与油气成藏

——以泌阳凹陷为例

符 勇 姜振泉 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书在全面介绍国内外油气成藏研究领域的重要研究成果、学术动态及学术观点基础上,基于丰富而翔实的油田水文地质资料,深入分析了泌阳凹陷油气成藏与地下水的关系,在地下水动力场、地下水化学场和地温场的形成机制、控制因素、变化规律及其对油气成藏的作用方面取得了重要发现,总结建立了泌阳凹陷“三场”耦合模型。

作为地下水与油气成藏问题的研究专著,本书的研究思路和研究方法可供水文地质、石油地质、地球化学方向的教学、科研和生产人员及高等院校本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水与油气成藏:以泌阳凹陷为例 / 符勇,姜振泉著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2007.8

ISBN 978 - 7 - 81107 - 667 - 7

I. 地… II. ①符…②姜… III. 地下水—关系—油气藏—
形成—研究—泌阳县 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118276 号

书 名 地下水与油气成藏——以泌阳凹陷为例

著 者 符 勇 姜振泉

责任编辑 潘俊成

责任校对 张海平

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 8.75 字数 218 千字

版次印次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序 言

地下水与油气同属地流体,油气成藏过程的各个环节都与地下水有着密切关系,二者如孪生姐妹一样,行影不离,在油气生成、运移、聚集乃至保存和破坏等过程中,地下水都起着重要作用。因此,油气成藏的水文地质环境成为石油地质学研究的重要内容,也是石油地质学与水文地质学的前沿研究领域。

本书基于丰富而翔实的勘探、实验和测试资料,深入分析了泌阳凹陷油气成藏的水动力环境、水化学环境和地温环境,揭示了地下水动力场、地下水化学场和地温场的形成机制、控制因素、变化规律及其对油气成藏的作用。

泌阳凹陷地下水动力场、地下水化学场和地温场等“三场”的变化规律能很好地反映泌阳凹陷油气成藏的水文地质环境,“三场”的环带状分布控制着油气的环带状分布,它们之间存在着明显的内在联系。围绕“三场”高势区的外围圈闭寻找油气藏可作为油气勘探的指导原则。

本书是在作者的博士学位论文——《南襄盆地泌阳凹陷油气成藏的水文地质环境》基础上补充了部分内容完稿的,由河南理工大学符勇博士主笔。值本书出版之际,作者对中国矿业大学王桂梁教授和隋旺华教授表示衷心的感谢。从本书选题到最后完稿,始终得到二位教授的热情关心和指导,王桂梁教授在百忙中对初稿进行了字斟句酌的审阅,提出了许多宝贵意见。河南石油勘探局前总地质师徐世庸教授级高工、王寿庆教授级高工和汪义先、周留纪、马金玉等高级工程师对本书给予了大力支持,河南石油勘探开发研究院资料室提供了大量的研究资料,马丽工程师对书中图件进行了清绘。本书还得到了河南理工大学博士基金的资助。在此,作者一并向他们表示真诚的感谢!

作 者
2007 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 研究意义	(1)
一、油气生成的水文地质环境	(1)
二、油气运移的水文地质环境	(2)
三、油气聚集的水文地质环境	(3)
四、油气保存和破坏的水文地质环境	(5)
第二节 研究现状	(6)
第三节 主要研究内容和技术方法	(10)
第二章 泌阳凹陷油气成藏的地质背景	(12)
第一节 大地构造位置与基底结构	(13)
第二节 盆地成因机制	(13)
第三节 地层与地质发育史	(14)
一、古近系玉皇顶—大仓房组(Ey—Ed)	(15)
二、古近系核桃园组(Eh)	(15)
三、古近系廖庄组(EI)	(17)
四、新近系上寺组和第四系(N、Q)	(17)
第二节 沉积环境与沉积相	(18)
一、凹陷中心的白云岩、天然碱沉积	(18)
二、南部陡坡带的平氏扇三角洲沉积	(18)
三、东北斜坡带的侯庄近源三角洲沉积	(18)
四、西北斜坡带的古城远源三角洲沉积	(19)
第三节 构造发育特征	(20)
一、区域构造发育特征	(20)
二、局部构造发育特征	(21)
第三章 地下水动力场对油气成藏的控制作用	(23)
第一节 水文地质期划分	(23)
第二节 地下水与油气运移	(24)
一、油气初次运移	(24)
二、油气二次运移	(30)

第三节 流体势分析	(35)
一、流体势的概念及其表达式	(35)
二、势梯度与流体运移方向	(36)
三、相对流体势与油气运移和聚集	(37)
第四节 流体压力封存箱	(38)
一、异常地层压力的产生原因	(39)
二、流体压力封存箱与流体运动	(39)
三、封闭层成因及特征	(42)
第五节 地下水动力场的形成与演化	(43)
一、地下水动力场的形成与演化控制因素	(43)
二、异常高压发育机制与流体排放机制	(44)
三、古地下水动力场的形成与演化	(48)
四、现今地下水动力场的形成与演化	(50)
第六节 地下水动力场对油气成藏的控制作用	(58)
一、地下水动力场的动力来源	(58)
二、平面上地下水动力场对油气成藏的控制作用	(59)
三、剖面上地下水动力场对油气成藏的控制作用	(62)
第七节 双河油田形成的水动力作用	(64)
一、双河油田形成的地质条件	(64)
二、水动力作用与水动力圈闭	(64)
三、双河油田形成的水动力作用	(66)
 第四章 地下水化学场对油气成藏的影响	(68)
第一节 油田水化学特征	(68)
一、水化学特征	(68)
二、低矿化度油田水与浅层地下水的区别	(71)
第二节 油田水化学成因	(72)
一、脱硫酸系数 $r(\text{SO}_4)/r(\text{SO}_4 + \text{Cl})$	(73)
二、脱钙镁系数 $r(\text{Ca} + \text{Mg})/r(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na})$	(73)
三、变质系数 $r(\text{Cl} - \text{Na})/r(\text{Mg})$	(76)
四、加氯系数 $r(\text{Cl})/r(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3 + \text{CO}_3)$	(76)
五、钠氯系数 $r(\text{Na})/r(\text{Cl})$	(76)
六、钠钙系数 $r(\text{Na})/r(\text{Ca})$	(76)
七、硼钙镁系数 $r(\text{B})/r(\text{Ca} + \text{Mg})$	(76)
第三节 油田水化学分区	(77)
一、强交替区(Ⅰ)	(77)
二、弱交替区(Ⅱ)	(77)
三、阻滞区(Ⅲ)	(77)
四、停滞区(Ⅳ)	(80)

第四节 地下水化学场对油气聚集的影响	(80)
第五节 地下水化学场对油气保存的影响	(81)
一、水型对油气保存的影响	(81)
二、油田水分区与油气保存	(81)
第六节 油碱共生的水化学环境	(82)
第五章 地温场控制因素及其与油气成藏的关系	(84)
第一节 研究方法	(84)
一、地温梯度计算	(84)
二、地温计算	(86)
三、温度—深度关系	(86)
第二节 地温场与古地温测定	(87)
一、基本概念	(87)
二、古地温的测定	(88)
第三节 地温场控制因素	(89)
一、地质构造	(89)
二、地层岩性	(91)
三、水动力作用	(91)
第四节 泌阳凹陷地温场与油气成藏的关系	(91)
一、油气田分布区地温场与油气成藏的关系	(92)
二、油气田分布区地温异常形成机制	(92)
第六章 含油气盆地流体系统	(94)
第一节 地下水系统	(95)
一、油田水系统	(95)
二、渗入水系统	(96)
三、我国含油气盆地地下水系统特征	(97)
第二节 含油气系统	(98)
第三节 地下水系统与含油气系统的关系	(99)
一、油田水系统与含油气系统	(99)
二、渗入水系统与含油气系统	(99)
第四节 对地下水系统的新认识	(100)
一、地下水系统的概念	(100)
二、地下水含水系统	(102)
三、地下水流动系统	(103)
四、对地下水系统理论的新认识	(111)
第七章 地下水三场耦合与油气成藏	(113)
第一节 三场耦合特征	(113)

一、地下水动力场与地下水化学场	(113)
二、地下水动力场与地温场	(114)
三、三场耦合特征	(114)
第二节 三场耦合模型	(114)
第三节 三场耦合研究在下二门油田油气勘探开发中的作用	(115)
一、在油气勘探中的作用	(117)
二、在油气田开发中的作用	(119)
 第八章 研究结论及建议	 (120)
 参考文献	 (122)

第一章 绪 论

Chapter 1 Preface

第一节 研究意义(Research meaning)

地下水与油气成藏属于地流体(Geofluid)的研究范畴,油气成藏的水文地质环境是石油地质学研究的重要内容,也是国际地学界高度关注的重大课题,20世纪90年代以来一直是石油地质学与水文地质学的前沿研究领域(E. C. D. Hooper, 1991; 沈照理等, 1994; 于在平, 1995; 王焰新等, 1996; 张人权等, 2005)。

油气成藏过程包括油气的生成、运移、聚集以及保存和破坏多个环节,每一个环节都与地下水有密切关系。油气水在地下像孪生姐妹一样,行影不离,在油气生成、运移以及油气藏形成和破坏过程中,地下水都起着重要作用(刘方槐, 1991)。因此,水文地质环境反映了一定构造背景下的油气成藏环境,水文地质环境的变化反映了油气成藏环境的变化。

一、油气生成的水文地质环境(Hydrogeological environment of hydrocarbon generation)

油气生成问题是石油地质学中一个非常复杂的问题,一个多世纪以来人们对这个问题一直争论不休。在影响油气生成的地质环境中,水文地质环境无疑是重要的环境因素之一。

含油气盆地的地下水可分为沉积水、渗入水和深成水(潘钟祥, 1986)。沉积水从一开始就含有一些从软泥水中继承下来的有机质(数毫克/升),进行着十分复杂的物理化学和生物化学作用,并积极参与了石油的生成过程(沈照理, 1985)。在成岩作用早期阶段,当烃源岩中的有机质还未来得及转化成油气时被挤出来的主要是水(H. A. 叶廖缅科, 2000)。这个阶段烃源岩孔隙率大(一般大于40%),渗透性好,沉积水以连续流形式从烃源岩中排出,这样,烃源岩中有机质的丰度就不断提高,并得以富集。在成岩作用晚期阶段,伴随着油气的大量生成,地下水和油气以油气水混相形式从烃源岩排向储集岩。

在压实作用下,泥质沉积物中的流体(主要是沉积水)要向砂质沉积物运移。砂质沉积物由于质点坚硬,在压实过程中主要表现为颗粒的进一步密集排列,所以压缩性小,体积的压缩很快就趋于稳定。这可从孔隙率的变化上得到反映。贮存在砂岩孔隙中的流体通常只承受负荷压力的较少部分,一般接近于静水压力。泥质沉积物比较细、软,可塑性较强,在压实过程中,除颗粒再排列外,还伴有颗粒本身的变形,所以压缩性大,且压缩持续时间较长。压实作用的早期,伴随上覆沉积物负荷的增加,泥质沉积物中孔隙水顺利排出,处于均衡压实状态,排水效率较高。一般深度在1 000 m以内为主要排水阶段(深度为500 m时约排出88%),至1 500 m时(已排出95%的水)排水速率明显减缓,至2 000 m渐趋于稳定(至2 500 m, 98%的水已排出)。随着埋藏深度的增加,泥岩排水效率逐渐降低,导致其孔隙流体排出滞后,因而其流体压力高于静水压力。在流体压力差的作用下,将迫使流体沿压力梯度降落方向从泥岩流入相邻的砂岩,以取得压力均衡。按晚期成油说,石油大量生成的门限

温度至少要 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,这在通常地温梯度下门限深度约为 $1\ 500\text{ m}$ 。在地温梯度较低的地区,该深度更大。显然,主要生油时期超越了主要排水时期。因此,靠均衡压实只能排出少许早期生成的烃,即前面曾提到的未成熟油气。总之,油气大量生成时,经历压实作用的泥质生油岩,泥质矿物质点的排列已经非常紧密,孔径很小,渗透性极差。这就需要一个异常高的孔隙水压力的水文地质环境。

油气生成主要与源岩在漫长的埋藏史中有机质逐步受热熟化和发生热降解有关。当生成的烃量足够多,能超过被有机质吸附的量时,多余的烃将释放出来,并溶于泥岩中的孔隙水。溶解的烃通过孔隙水或黏土矿物结晶格架中排出的水,在机械压实作用和热力作用下,排替到相邻的储集层中。由于泥岩黏土颗粒具有优先吸附水分子的特性(水润湿性),烃分子势必因黏土颗粒的选择性吸附作用而被排斥,逐步从颗粒表面移开,沿着阻力最小的方向扩散,通过较大的孔隙、层面或微裂隙,最终进入相邻的储集层,而不需要大量孔隙水的冲洗。

勘探实践证明,长期持续下沉的含油气盆地有利于油气生成。因为在这种构造背景下,盆地不断扩大,水体不断加深,产生还原的水体介质,形成封闭的水文地质环境,并使沉积的有机质得以保存,同时有大量的沉积水也一同保存下来。在漫长的地质年代中,这些沉积水除积极参与油气的生成外,其本身的性质也受到了改造,一方面形成与所处的水文地质环境相一致的化学组分,另一方面水文地质环境的变化也会引起化学组分的变化。在沉积水的作用下,水化学成分演化的总趋势是向不断浓缩、盐化的正变质方向演化,其规律是水中稳定组分聚集,不稳定组分贫化,氧化组分减少,还原组分增多(孙世雄等,1991)。这种相对稳定的还原环境正是有利于油气生成的水文地质环境。

二、油气运移的水文地质环境(Hydrogeological environment of hydrocarbon migration)

油气具有流动的趋势,只要没有约束条件,它们就会无休止地运动下去,直至到达地表面逸散。油气不同于固体矿产的最大特点是具有显著的运移性。地层孔隙中的油气水都是流体,它们的流动受相同的动力条件控制。在沉积盆地内,由于孔隙介质中始终充满了地下水,油气运移始终会受到水动力的作用(金之钧等,2003)。地下水是含油气盆地流体的主体部分,地下水的运动对油气运移具有控制作用。

从水文地质观点看,油气运移总是和地下水活动有着密切关系,地下水不仅是油气运移过程中的驱动力,而且也是油气运移过程中的载体,它们在地质历史过程中相伴生而发展(地质矿产部水文地质工程地质研究所,1987)。20世纪80年代以来,油气运移的水动力作用已得到广泛研究和证实(E. C. Dahlberg, 1995; W. A. England 等,1987; N. S. Fishman, 1997)。许多学者已充分肯定了地下水动力场与油气运移间的密切关系,水动力作用的方向与油气运移的方向基本一致,油气是在区域水动力作用下沿着流体势降低最快的方向运移(K. Magard, 1978; J. Toth, 1978; 杨绪充, 1989; 查明等, 1996; 楼章华, 1997; 楼章华等, 2005; 朱蓉等, 2003)。无论是油气初次运移还是二次运移,都有部分烃类呈水溶相与地下水一起运移。即使是呈游离相态的烃类在运移过程中也会受到地下水动力条件的制约,即在浮力和水动力的共同作用下运移。因此,油气运移和地下水的关系极为密切。

新沉积的软泥含水量可达80%以上,在压实作用下逐渐从悬浮状态、流动稀释状态变至可塑状态,最后固结成岩(李明诚,1994)。在这一演化过程中会排出大量的水,其孔隙度

也随之降低至5%。这一成岩作用过程是一个相当漫长的过程,而且是不可逆的。在高温高压条件下,油气以溶解状态储存在孔隙水中,油气运移过程中始终和水处于同一系统中(马启富等,2000)。因此,油气运移过程伴随着压实排水过程。

近年来,对油气运移机理研究有了重大进展,认识到泥岩压实、水热增压、生烃增压和黏土矿物转化所产生的增压作用等,使生油层内孔隙水压力增大,使生油层与储集层之间产生压力差,正是这个压力差成为烃克服生油层毛细管的阻力和对烃的吸附力,或者使生油层产生微裂隙,从而使烃类从生油层中排出。因此,研究孔隙水压力特征成为研究油气运移的重要手段。

水动力是油气运移的主要动力,其能量主要来源于泥岩中发育的异常高压。沉积盆地中的泥岩,尤其是盆地中心的厚层泥岩,是异常高压发育的有利场所,因而盆地中心往往是异常高压中心(方世虎等,2003)。异常高压的发育为地下水运动提供了能量,为油气运移提供了动力,所以盆地中心往往也是生烃中心。当泥岩内部的异常高压积累到一定程度时,就会发生水力破裂,使泥岩中的流体“火山喷发”式地向外排放,短时间内大量涌出,数年至数百年的排放量相当于破裂之前数百万年的渗流量(雷茂盛等,1999)。理论上地层压力系数在1.84以上时,泥岩就会破裂而产生微裂隙(李志等,2003)。烃源岩中的油气在异常高压的作用下,向相对低压的砂体运移,进入构造部位相对较高、压力相对较小的砂体中。被断层切割的砂体,压力易于释放,聚集油气的条件较好。纵向上砂岩、泥岩频繁间互,砂岩横向分布范围广,有利于油气的侧向运移。泥岩层广泛发育异常高压,砂泥岩压力差是泥岩(烃源岩)向砂岩排水、排烃的主要动力。在沉积沉降中心,沉降沉积速率最高,充填岩性最细,生烃强度最大,超压顶面隆起点埋深最小,流体压力最容易达到地层破裂压力。当然,构造应力也是泥岩流体排放原因之一,但它只是外因,内因是泥岩中发育的异常高压。当泥岩埋藏深度达到生烃门限后,生烃增压、水热增压、黏土矿物转化脱水等物理化学作用会使流体排放加剧,油气运移加速,但水动力仍然是油气运移的主要动力(符勇等,2007)。

三、油气聚集的水文地质环境 (Hydrogeological environment of hydrocarbon accumulation)

由盆地演化史可知,油气聚集是一个动态平衡过程。由于渗入水作用方向与沉积水作用方向正好相反,起到了阻止沉积水和油气进一步向上溢散的作用,使盆地内的地下水系统达到一个动态平衡。油气聚集过程主要表现在以下几个方面:

(1) 在均质砂层组成的背斜圈闭系统中,进入圈闭高位的油气,在浮力作用下自上而下充注砂层,只要封隔层的封闭能力足够大,油气就有可能充满整个背斜圈闭。

(2) 在反韵律砂层组成的背斜圈闭系统中,进入顶部粗砂层中的油气在背斜圈闭的顶部开始聚集。当油气在粗砂层中聚集到一定高度后,油气向下排替水,并沿粗砂层底界面进入下部砂层,从而在下部砂层中聚集。

(3) 在正韵律砂层组成的背斜圈闭系统中,自底部进入粗砂层中的油气开始时在粗砂层中聚集。随着聚集的油粒高度的不断增加,当油柱所受的浮力大于粗砂层与上部砂层间的毛细管力之差时,油气便突破界面向上运移,并在背斜顶部聚集成藏。

在油气聚集的初期,水可以通过上覆盖层而发生越流;当油气聚集到一定程度之后,水就很难通过上覆盖层而主要是被油气排替到圈闭的下方。如果盖层是异常高压封闭,则无

论是什么情况水都不能通过上覆盖层而发生越流,只能发生向下的排替作用。

油气聚集与地下水动力场关系密切。据 J. Toth(1980)研究,世界上大部分油气田都分布于古地形或现代地形相对较低的地下水排泄区,也就是说,油气聚集与区域地下水系统的排泄区,即低势区相伴生。

油气聚集也与地下水化学场关系密切。油气聚集带一般处于水文地质环境比较稳定的还原环境,矿化度一般较高,水型多为 NaHCO_3 或 CaCl_2 型水。

由于油气和水的运移阻力不同,压差驱动且油(气)水共存条件下,水先运移,而油(气)则自近源点开始聚集。在压差驱动下,石油会向孔隙较发育的砂岩层运移。进入砂岩后,发生近源优势聚集。在供油量充足的前提下,继续注入则聚集形成一段连续油相。连续油相形成后,在水动力和浮力的驱动下,油沿着阻力最小的通道上浮,从而形成一条较连续的通道。在油相通道形成后,石油就可以沿着这条通道不断传输。因此,油上浮的过程就是连续油相通道不断延伸的过程。当油相运移通道前缘遇到圈闭时,油就会发生聚集,使圈闭内油饱和度增加。含烃的水或随水运移的油气进入圈闭后,水可通过盖层继续运移,而对烃类则产生毛细管封闭,结果把油气过滤出来,从而在圈闭中形成聚集。

储集层因构造运动上升变浅时,油层的压力相应地下降,于是油内的溶解气将游离析出,形成气顶。这时气占有原先石油占据的空间,而将石油挤出圈闭,溢向储集层上倾方向。如果储集层上倾方向有适当的圈闭,就可聚集起来形成新的油藏。水动力作用不仅造成油水界面倾斜,而且明显改变圈闭的大小和位置,甚至使原有圈闭消失。因此,在水动力作用下,可以使原有油气藏中的油气发生再分布和再聚集。

运移着的油气,如果遇到阻止其继续运移的遮挡物,则其停止继续运移,并在遮挡物附近聚集,形成油气藏。所以从油气运移的角度来看,圈闭是储集层中可以阻止油气向前继续运移,并在那里储存起来成为油气聚集的一种场所。也可以说圈闭是储集层中能聚集和保存油气的场所。或者更形象地说,圈闭是储集层能作为盛装油气的容器部分。在具有油气来源的前提下,圈闭的存在是油气聚集的必要条件。按照石油水文地质学的观点,圈闭可分为地质圈闭、水力圈闭和水动力圈闭三种。地质圈闭包括构造圈闭、地层圈闭和岩性圈闭等;水力圈闭是低势区不同水流相遇后流线收敛形成的圈闭;水动力圈闭是单向水流的水动力作用形成的圈闭(符勇等,1991)。水动力圈闭能使油气藏产生一定的位移,使油水界面发生倾斜。

地下水与油气在地层中长期同存,油气中的某些组分必然以各种方式或多或少地转入地下水中,因此,研究地下水中有机组分与油气聚集的关系十分密切。

地下水中苯及其同系物(甲苯、乙苯等)、环烷酸挥发有机酸、酚和铵等的分布与区域水文地质条件有关。苯及其同系物是石油中的芳烃简单成分,酚是它们的衍生物,在水中溶解度较大,并随温度、压力而变化。环烷酸是一种有机酸,也是石油的组分之一,它的钾钠盐易溶于水。

据有机成油理论,动植物体内蛋白质可分解为氨和烃类,氨易溶于水,部分转化为铵。铵的分布十分广泛,并与凹陷内地下水矿化度有一定关系,矿化度高的地区往往铵含量也高,表明地下水运动在阻滞的封闭条件下,高矿化水有利于有机物向铵转化。因而铵是反映地下水与油气聚集的一个重要指标。

酚是来自原油中芳香族的有机化合物,它在水中溶解度大,在温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在水中溶解

度为 6.7%，在 68℃ 以下则可完全溶解。酚在地下水中分布广泛，在不同层位地下水中或多或少地存在。

苯及其同系物、环烷酸、酚和铵在油田水和非油田水中的含量是不同的，油田水中的含量比非油田水的含量高，而且越靠近油气藏含量越高。因此，油田水中有机组分增加的方向是寻找油气藏的方向，其高值带是油气藏可能存在的有利区。

四、油气保存和破坏的水文地质环境 (Hydrogeological environment of hydrocarbon preservation)

油气成藏必须处于地下水运动的条件下才有可能，但成藏之后要得到很好的保存，则要求一个封闭的水文地质环境。

油气与其周围介质处于连续不断的相互作用之中。所谓油气藏的破坏是由于氧化作用或轻质烃类组分的扩散离开，致使油气发生物理化学变化，而失去石油本性的各种过程，和导致工业性油气聚集的机械分解，使其转变为非工业性聚集的所有作用过程的总和。油气藏在三种情况下可能遭受机械破坏作用：当地层中水动力梯度增大时；当盖层的遮挡能力减弱时；当圈闭的容积和表面形状发生变化时。一般认为，地层中的原油稠化作用有三种影响因素：烃类氧化作用、水洗作用和菌解作用。由于烷烃的化学性质相当稳定，必须在燃点温度才能与氧发生氧化反应。因此可以认为地下水所提供的氧气为细菌的存在与菌解氧化反应提供了条件。泌阳凹陷北斜坡上的井楼油田原油相对密度为 0.939 6，是稠油，其中胶质与沥青质含量高达 45%，这些重油的出现是原油在二次运移中遭到氧化和生物降解作用的结果。克拉玛依储集层出露地面，造成轻质组分大量散失，使重质组分相对聚集，加上地下水和喜氧细菌的作用，引起沥青胶冻沉淀，降低了岩石的孔隙度和渗透率，从而阻止了油气的进一步散失，构成沥青封闭。这些重质油的形成，是在特定的地质和水文地质条件下，经细菌脱蜡的结果。这也说明在喜氧细菌作用下，石油会发生明显的降解作用，改变其原有的某些组分。

传统石油地质学认为，油气是很容易逸散的，因此保存条件十分重要。目前研究表明，保存条件对油气来讲并不是十分苛刻的，油气藏变化最突出方面在于油气水关系的局部调整，油气藏变化后总会留下痕迹。地下水作为最活跃的地质因素之一，不仅是油气聚集成藏的重要因素，而且是油气保存和破坏的重要因素(孙世雄等, 1991)。油气的保存和破坏是在水文地质环境中进行的，地下水及溶解于其中的一些物质是油气保存和破坏的基本因素，地下水以机械的、物理化学的和生物化学的方式破坏油气藏(地质矿产部水文地质工程地质研究所, 1987)。

水动力环境对油气保存和破坏有重要影响。水动力太强，油气藏就会遭受水洗破坏；水动力太弱，又不利于油气运移和聚集成藏。因此，一个相对稳定的水动力环境有利于油气保存。另外，外界条件的变化，会引起水动力环境的变化，从而对油气保存产生影响。对于地层圈闭来说，上倾水流水动力强度的增加可以削弱上倾盖层的封闭能力，使圈闭中最大含油高度减小，造成部分油气漏失；对于背斜圈闭来说，水动力增强将削弱背斜顶部盖层的封闭能力，引起部分油气漏失(陈章明等, 2003)；对于水力圈闭和水动力圈闭来说，水动力环境的变化会导致圈闭条件的变化，可能将油气驱赶到圈闭之外，而使油气藏遭到破坏。

水化学环境对油气的保存和破坏也有重要影响。在一个水交替强烈的水化学环境中，

渗入水作用会引起地下水矿化度降低,不利于油气保存。另一方面,水中氧化性物质(诸如氧气、硫酸盐络阴离子等)对油气的氧化作用,也会导致油气藏破坏。含有氧化性物质的水往往与渗入水有关,因而渗入水的侵入往往会导致油气藏发生物理、化学破坏作用(地质矿产部水文地质工程地质研究所,1987)。但这种破坏作用的速度要比地下水冲刷产生的机械破坏作用慢得多。另外,水型也可以反映油气保存条件。氯化钠型水是区域水动力场相对阻滞区,由于地下水处于还原环境中,发生浓缩和强烈脱硫酸作用,因而 SO_4^{2-} 含量很小或不存在, Na^+ 和 Cl^- 相对富集,这种水化学环境反映了储油圈闭的良好性质,有利于油气藏保存。

第二节 研究现状(Research present situation)

含油气盆地在形成演化过程中,经历了压实、成岩和构造变动等一系列的地质作用,也造成地下水动力场、地下水化学场和地温场的一系列变化,进而改造了盆地中油气的成藏环境,使其在水文地质条件和石油地质条件有利的地段聚集成藏。

国内外地下水与油气成藏机理的研究大致经历三个阶段:

第一阶段:20 世纪初至 50 年代(The first stage:Initial 20th century to fifties)

早在 20 世纪初,许多学者就涉足于地下水与油气成藏机理的研究。M. J. Munn(1909)进行的流动水体对石油分布影响的实验研究,发现了石油沿水流方向移动且油水界面发生倾斜现象,由此他提出了油气运聚的水力学说。他认为地下水的流动使油气产生运移,渗透率的差异引起流体前缘的不同部位以不同的速度向前推进,携带油气的地下水会使油气在一定的部位被圈闭并保存下来。

E. W. Shaw(1917)对 Appalachian 油田砂岩中的油田水问题进行了讨论,H. V. Dodd(1922)对低角度倾斜石油运移问题所做的实验研究,从不同侧面支持了 M. J. Munn 的研究观点。

J. L. Rich(1921,1923,1931)提出的流体通过高渗透性砂层进行长距离横向运移的概念进一步发展了 M. J. Munn 的水力学理论,他认为这些砂层可以集取上下层及自身的流体,并将它们由海拔高的补给区输送到下游的排泄区。在排泄区,背斜或其他构造因具有裂隙而利于流体汇聚,成为油气聚集区。

V. C. Illing(1933)进行的油水共同流过某些粗细交替砂层的实验研究,表明流动的水可以促进油水的重力分异,而且小孔隙的岩层只允许水通过,石油滞流并聚集在孔隙较大的岩层中。

M. K. Hubbert(1940,1953)进行的动水条件下的油气水界面倾斜实验研究,论证了油气在圈闭中聚集所必须达到的能量条件,完善了油气运聚的水力学说。他发表的关于地下水运动理论的著作,系统论述了开阔盆地中地下水运动,首次用流体势的概念、理论和方法对地下流体的运动状态进行了比较全面的描述。关于油气运聚的条件,他提出圈闭的基本要求是要有一个局部低能量区,并将其理论称为“在水动力条件下油气运移和圈闭的一般理论”。1959 年,他与 Rubey 的合作研究,用流体压力揭示了低角度逆掩断层的形成机制,首次阐明了流体在地壳演化中的重要作用。M. K. Hubbert 是国外地下水与油气成藏研究领域成果丰硕的著名学者,他的重要贡献是提出了流体势的概念,研究了地下流体的能量变化

和流体运移规律,将油气成藏过程作为动力学过程,并根据流体势分布判断油气水的运动方向,解决油气运移和成藏问题,从而使油气成藏机理研究建立在科学基础上。但该理论的缺陷是没有考虑地下水的区域性流动。

前苏联学者在这一阶段对地下水与油气成藏机理也做了大量的研究,但其主要侧重点是水文地球化学方面,对地下水动力场方面的研究较少。苏林在其论著《天然水系中的油田水》和《油田水文地质学》中,阐述了很多关于油田水的重要理论。这些理论在研究油田水方面具有重大意义,对我国也有一定影响,尤其是苏林关于油田水的化学分类,更是广泛地被我国油气水文地质工作者所采用(刘方槐等,1991)。

第二阶段:20世纪60年代至80年代(The second stage: sixties to eighties in 20th century)

20世纪60年代至80年代,地下水对油气成藏的重要影响逐步为众多学者所认识,许多学者在该领域进行了更深入的研究。J. Toth(1962,1963,1968,1970,1972,1978,1980,1986,1987)深入研究了地下水与油气成藏的关系,把盆地中区域地下水动力场的分布、演化和油气运聚结合起来,创立了重力穿层理论。更重要的是J. Toth在M. K. Hubbert理论基础上,把油气成藏与区域地下水运动结合起来,把水文地质学的理论和方法应用于石油勘探和盆地分析,形成了一门新的学科——石油水文地质学。

美国的R. A. Freeze(1966,1967,1968,1972)和P. A. Withenspoon(1967)及加拿大的B. Hitchon(1969,1971)等学者相继对地下水的重力穿层运动及其表现形态进行了研究,进一步揭示了油气成藏与地形控制的区域地下水运动之间的密切关系。

E. C. Dahlberg(1982)在M. K. Hubbert流体势理论的基础上,将流体势理论和方法与石油勘探的实际工作有机结合起来,提出了UVZ法则,即通过编制油势、气势和水势圈闭图,为勘探水动力圈闭油气藏提供依据,并提高了人们对油气成藏过程中势能的认识。

W. A. England等(1987)基于流体势和达西定律所建立的油水二相、二维(侧向运移和垂向运移)渗流运移模型,对于揭示油气二次运移和聚集规律具有重要意义。

这一阶段国内对地下水与油气成藏的研究也取得了重要进展。刘方槐等(1961)从水文地质学角度,探讨了川南泸州古隆起天然气运聚与保存问题,他在国内最早用流体势理论分析解释了四川盆地天然气运聚规律。

地质矿产部水文地质工程地质研究所(1987)对冀中坳陷油气成藏的水文地质环境进行了深入研究,从不同角度探讨了水动力场、水化学场和地温场对油气成藏的作用,油田水的水文地球化学效应及地下水对油气分布规律的控制作用,论证了地下水形成史与油气成藏史之间的关系,提出了地下水的形成模式及其对油气生成、运聚和圈闭的影响。该成果对我国在油田水文地质和水文地球化学领域研究具有里程碑意义。

刘崇禧等(1988)总结了我国水文地球化学找油的理论和方法,对水文地球化学找油原理、油田水文地质特征进行了比较系统的论述,讨论了油田水的成因与演化历史,研究了水文地球化学异常形成的地质背景与展布规律,筛选了水文地球化学找油指标,并通过典型的找油实例提出了油田水文地球化学异常模式。地下水与油气成藏机理的研究也引起了一些石油地质学家的关注。

杨绪充(1985,1988,1989)总结了含油气盆地地下水的能量特征、流动特征、压力特征和测势面特征等,将盆地按地下水动力环境划分为压实流盆地、重力流盆地和滞流盆地三种基

本类型。在这三种基本类型之间存在具过渡性特征的叠合盆地,即压实流—重力流叠合盆地和重力流—滞流叠合盆地,如图 1-1 所示。他认为压实流盆地中地下水为超压系统,由盆地沉降中心的较深部位流向盆地边缘和浅部,构成离心流,油气围绕盆地中心呈环带状聚集分布;重力流盆地中地下水为动压系统,由盆地边缘流向盆地中心,构成向心流,油气一般聚集分布于排泄区;滞流盆地中地下水为静压系统,基本不流动。

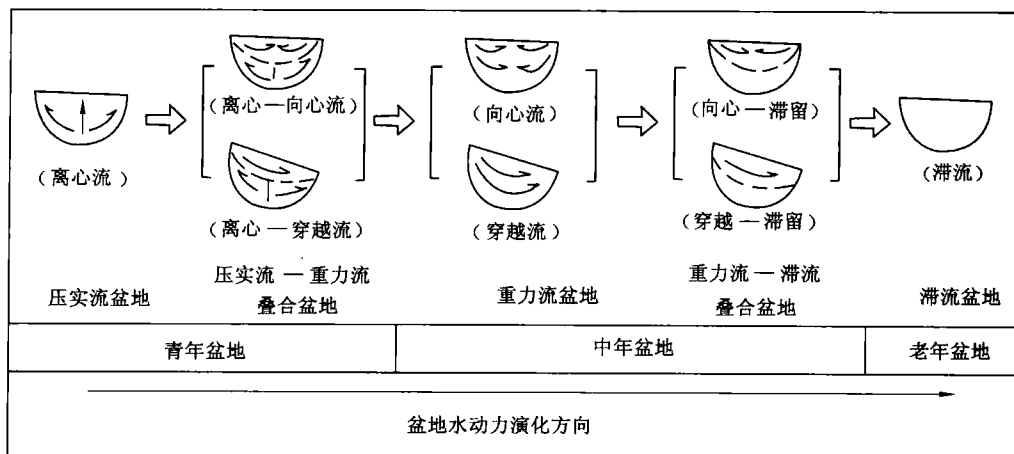


图 1-1 含油气盆地地下水动力演化示意图(据杨绪充,1989)

陈发景等(1988)结合我国油气勘探实践,研究了泥岩压实作用与地层孔隙流体压力特征及油气运移特征,并出版了《压实与油气运移》。他们认为岩性条件决定排水条件,泥质含量高,排水条件差,易于形成欠压实;砂质含量高,排水条件好,则易于形成正常压实;孔隙水压力高值带和低值带相隔出现的特征在古近系沉积盆地中具有普遍性;异常高压的存在对油气形成了有效封闭,储集层中的油气不会穿越泥岩向上运移,只能沿储集层侧向运移,在一些相对低势区的圈闭中聚集成藏。

第三阶段:20 世纪 90 年代至现在 (The third stage:nineties in 20th century to present)

近十几年来,国内外许多学者从不同角度对地下水与油气成藏机理进行了新的探索。

J. M. Hunt(1990,1994)将油气的生成、运移、聚集有机地结合起来,提出了著名的“异常流体压力封存箱”(Abnormally pressured fluid compartments)理论,为油气成藏机理研究提供了一种新的思路,深受石油地质界重视。他认为许多沉积盆地都具有两个或两个以上叠合的水文地质系统。通常情况下上部系统在盆地范围内广泛分布,具有正常的静水压力;下部系统是油气生成带,在盆地范围内分布有限,并且往往发育异常高压,通常由若干个流体压力封存箱组成,具有封闭的水动力系统,与上部系统无水力联系。箱顶无特定层位,而是受地下温度 90℃~100℃的等温面“封闭”,其深度随地温梯度而异,梯度愈小,“封闭”愈深。封存箱内油气生成和孔隙流体热膨胀可导致箱顶破裂,流体垂向运移进入上覆低压箱的圈闭聚集,原箱压降封闭,至内压上升达另一破裂点。这种封闭—破裂不断循环的幕式作用可能间隔几千年。油气可在箱内、箱缘和箱外聚集成藏,至于能否成藏则取决于油气的生成、运移、聚集和保存条件。目前研究表明,在国内外大多数的中生代沉积盆地中都存在一个或多个封存箱,封存箱的研究对了解地下水的分布、油气运聚及油气勘探均具重大意

义(李明诚,2000)。20世纪90年代以来,异常流体压力封存箱的研究已成为石油地质学的重要前沿研究领域(G. Holm, 1990; D. E. Powley, 1990; J. S. Bradley 等, 1994; J. A. Cartwright, 1994; Darby 等, 1996; 李军等, 2001; 张金川等, 2003; 隋风贵, 2004; 王胜利等, 2004; Ann Muggeridge 等, 2005)。

这一阶段一些学者应用数值模拟和物理模拟等先进的油气勘探技术对地下水与油气成藏机理进行了系统研究,将达西定律扩展到多相流动,在计算机上再现与时间有关的油气运聚过程。例如, P. M. Ungerer 等(1990)建立了一个考虑多孔介质中烃、水两相流动的二维运移模型,模拟再现了弗里格剖面的天然气运移和成藏过程。Vingrer 等(1990)建立了一个考虑水介质中两相(烃和水)流动的二维油气二次运聚模型,模拟油气二次运移的动力和方向。Braester 等(1991)建立了三相二维油气运移模型,模拟了死海地堑西南缘 Zohar 气田侏罗系非对称背斜构造内水动力作用下油气的二次运移和聚集。

同期,国内对油气成藏水文地质环境的研究也取得了重要进展。刘方槐(1991)运用古水文地质分析方法,阐述了地下水对油气成藏的影响,结合我国油气勘探开发的实际,创立并完善了油气田水文地质学,在利用水文地质学基本原理解决油气地质学问题方面作出了开拓性的工作。他认为油气田水文地质学是研究含油气地区地下水的科学,即研究该地区地下水的形成条件、运动规律、分布及埋藏条件、动态变化规律,以及地下水在油气运聚、油气藏形成、保存和破坏、油气勘探和开发过程中的作用等。根据他的研究成果,沉积盆地的地下水主要受沉积水控制,沉积水长期流向的地区往往就是油气富集带。

孙世雄(1991)通过对地下水成矿的古水文地质条件、古地下水活动形迹和古泄水区的分布等方面研究,认为携带油气的沉积水由盆地沉积中心的高压区向盆地上倾地带的低压区运动,在沉积水系统与渗入水系统相遇的压力平衡带(锋面)向上作垂直运动,在有利的岩性或构造圈闭中聚集成藏,地下水作为最活跃的地质因素之一,不仅是油气聚集成藏的重要因素,而且是油气保存和破坏的重要因素。

李明诚(1994, 2001, 2002)将盆地中的油气水作为一个整体进行研究,提出了地流体和盆地流体等概念,他认为油气运移是盆地内的地流体活动,是盆地流体与盆地岩石在温度、压力场下的相互作用的必然结果;地流体活动贯穿于整个油气的生成、运移、聚集和散失过程,直接控制着油气藏的形成,同时还要受盆地外地流体的影响;地流体的作用为油气运移和聚集提供了动力、通道和场所,造成油气的幕式排烃、幕式运移和幕式充注,地流体的幕式流动与盆地构造的幕式运动相辅相成,互为因果。

楼章华等(1997, 1998, 2001, 2003)从盆地流体历史分析的角度对松辽盆地和东营凹陷地下水动力场的形成和演化作了详细的研究,将沉积盆地地下水动力场的理想模式归纳为对称型和不对称型两种,将地下水动力单元划分为沉积水离心流,渗入水向心流,越流—越流蒸发泄水和滞流4种类型:

(1) 沉积水离心流:随着埋深和负荷的加大,泥岩压实排水,同时发育异常高压。排出水进入相邻的渗透层,形成高压。高压由凹陷中心往盆地边缘呈不规则环状减弱,由此引起的势能导致由凹陷中心往边缘放射状的地下水流动,称为沉积水离心流。离心流区以湖相泥岩发育和砂岩百分率低为特征。离心流区的地层压力以高压为主,在离心流方向上,压力系数呈不规则环状降低。地下水被沉积水交替。

(2) 渗入水向心流:盆地边缘和盆地隆起区的地下水在重力作用下形成渗入水向心流。