

曹俊兴 刘树根 何晓燕 / 著

震控成藏

I

导论

Introduction to
Earthquake-induced Hydrocarbon Migration
and Accumulation



科学出版社

震控成藏导论

曹俊兴 刘树根 何晓燕 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金重点项目(40930424)部分研究成果的总结。全书系统介绍作者提出的震控成藏的概念、基本证据及主要的科学技术问题。震控成藏是继源控成藏、相控成藏理论之后的又一个新的油气成藏理论,为油气运移与成藏机制分析提供了新的视角,对指导我国及世界前陆盆地的油气勘探具有重要的参考价值。

本书可供油气地质勘探领域的研究和技术管理人员以及相关专业院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

震控成藏导论 / 曹俊兴, 刘树根, 何晓燕著. — 北京: 科学出版社, 2014.10

ISBN 978-7-03-042249-1

I. ①震… II. ①曹… ②刘… ③何… III. ①地震-关系-油气藏形成-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 245561 号

责任编辑: 莫永国 / 责任校对: 罗 莉

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第 一 版 开本: B5 (720*1000)

2014年11月第一次印刷 印张: 5.5

字数: 120千字

定价: 69.00元

前 言

油气是关系国计民生的战略性紧缺资源。油气的增储上产是我国的战略性的任务，而油气的增储上产需要有科学的理论指导与相应的技术支持。陆相生油、源控论、相控论、岩性油气藏、多期次成藏、页岩气等理论或假设，极大地推动过油气的增储上产。科学发现、科学创新无止境，在油气成藏领域，肯定还会有新的发现、新的认识。

油气成藏是地球系统演化的一部分。关于地球演化，渐变说与突变说争论了数百年，各自都有无可辩驳的证据。实际情况可能是：地球演化是渐变与突变交替进行，而且是突变主导，渐变演进。地球系统演化如此，油气成藏过程也是如此。绝大部分油气藏都有断裂发育，绝大部分的油气成藏都和断裂活动有关。今天的断层，都是曾经的地震的产物。因此，今天的油气藏，绝大部分都和曾经的地震活动有关。我们认识到这一点，完全是因为 2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震。汶川地震在龙门山形成了大规模的同地震破裂，引起了大范围的地下水异常迁移和川西许多天然气生产井的产量变化。这表明地震能引起大范围、大规模的油气快速迁移。由此我们认识到，存在油气运移成藏的震控机制。这一认识，可以称之为油气成藏的震控论。

前陆盆地是最重要的油气勘探领域之一。前陆盆地基本上都毗邻冲断地震带。因此，前陆盆地的油气成藏很可能受冲断带地震的控制与影响。

本书首先介绍汶川地震的地下流体效应和构造形变效应证据；然后分析其油气成藏效应；并在此基础上，分析震控成藏的机制，以及龙门山地震对川西油气二次运移成藏的控制性影响。

本项目的研究由国家自然科学基金委员会(40930424)和油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助。中国石化西南油气田分公司和中国石油西南油气分公司为本项目的研究提供了大量数据资料。中国石化、中国石油、中国科学院、吉林大学、西北大学、MIT 等单位的许多学者给予过指导或有益的建议。郑懿、舒亚祥、刘巧霞等博硕士研究生编绘了部分图件；赵亮、邓斌、王兴建、孙玮等同事给予了多方面的协助，藉此表示衷心的感谢！

本书引用了许多前人的研究成果，作者在此向所有引文的作者表示衷心的感谢和崇高的敬意。

本研究学科跨度很大，作者学识有限，错谬在所难免，敬请指正！

作者

2013 年 12 月

• i •

目 录

第 1 章 油气与油气成藏	1
1.1 石油和天然气	1
1.1.1 石油	1
1.1.2 天然气	3
1.2 油气藏	4
1.3 油气成藏	6
1.3.1 初次运移	7
1.3.2 二次运移	8
1.4 油气成藏研究的历史与未来	9
第 2 章 地震引起的地下水与油气异常运移	11
2.1 汶川地震引起的地下水异常运移	11
2.2 汶川地震引起的油气异常迁移	16
2.2.1 汶川地震后四川盆地西中部新出现的天然气苗	16
2.2.2 汶川地震引起的川西天然气气井产量变化	19
2.2.3 芦山地震引起的川西天然气气井产量变化	23
2.3 历史地震引起的地下水异常迁移	24
2.4 历史地震引起的油气异常迁移	28
2.4.1 国内相关研究	28
2.4.2 国外相关研究	29
第 3 章 龙门山地震的构造效应及其成藏效应	32
3.1 龙门山构造带	32
3.2 汶川地震的同震破裂	35
3.3 汶川地震的地腹构造效应	38
3.4 汶川地震构造变形的成藏效应	41
3.5 汶川地震地腹断裂的油气成藏效应	47
第 4 章 震控成藏——地震控制的油气运移与聚散	51
4.1 地震影响地下流体迁移的机制	51
4.1.1 震控油气运移的宏观机制	54
4.1.2 震控油气运移的微观机制	55
4.2 同震破裂的疏导与闭合	62

4.3 地震活动性与油气成藏	66
4.4 龙门山地震对川西油气二次运移与聚散的控制性影响	67
第5章 认识与讨论	73
参考文献	75
索引	79

第 1 章 油气与油气成藏

石油和天然气，简称油气，是指在地质历史时期形成，赋存在地下岩石孔裂隙中的可燃性碳氢化合物。石油和天然气的成生储既有差别，更有密切的联系。因此，本书将油气的运移、成藏统一进行讨论。

聚集了油气的地质构造单元称为油气藏。油气藏是油气勘探、开发的对象。“油气成藏”作为一个学术术语，是指油气藏的形成；作为一个研究领域，其探究的是油气的形成与聚集过程以及机理与机制。油气成藏是油气地质学的基本研究内容，但油气成藏分析涉及地质构造、地球动力演化、渗流力学等众多学科。

“油气成藏”研究在内涵与外延上尚无清晰的界定。因此，不同学者所称的“油气成藏”在内涵与外延上可能会有所不同。本书在一般意义上使用“油气成藏”一词，是指油气藏的形成，侧重油气的二次运移与聚散。

1.1 石油和天然气

1.1.1 石油

石油又称原油，是以碳氢化合物为主要成分，赋存在岩石孔裂隙中的棕黑色可燃性油质液体矿物。石油与煤同属化石燃料，是目前世界上最重要的一次能源。2013 年，全球开采原油逾 44 亿吨，其中约 88% 的原油被用来提炼汽油、柴油、煤油等燃油，约 12% 被用作诸如溶剂、化肥、塑料、农药等化工产品的原材料。2013 年，我国开采原油约 2.1 亿吨，消耗约 4.9 亿吨，原油对外依存度超过了 57.39%。

石油的化学组成主要是碳(83%~87%)、氢(11%~14%)，其余为硫(0.06%~0.8%)、氮(0.02%~1.7%)、氧(0.08%~1.82%)，另有少量微量金属元素(镍、钒、铁、锑等)。碳和氢化合形成的烃类构成石油的主要组成部分，约占 95%~99%。各种烃类按其结构可分为：烷烃、环烷烃、芳香烃，而石油通常是这些烃类化合物的混合物。不同地区产出的石油其主要成分可能会有一定的差别。石油依主要成分的不同可区分为轻质原油、凝析油、重油等类型。

石油的物理化学性质因产地而异(实际是化学组成不同)，密度为 0.8~1.0 g/cm³，黏度范围很宽，凝固点差别很大(-60~30℃)，沸点范围为常温到 500℃ 以上，可溶于多种有机溶剂，不溶于水，但可与水形成乳状液。

我国原油产量多以吨计。国际贸易中常以“桶”计，1 桶为 42 加仑，约合 158.98 升。因为各地出产的石油的密度不尽相同，所以一桶石油的重量也不尽

相同。一般的，一吨石油大约有 7 桶，轻质油则为 7.1~7.3 桶不等。

石油资源的分布极不均匀，全世界目前发现的石油约有 2/3 在中东波斯湾地区，俄罗斯、美国、中国、南美洲等地都有很大的储藏量。我国的石油资源主要分布在松辽盆地和环渤海湾盆地；此外，塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、珠江口和东海陆架等地也有很大的藏量。

关于石油的形成有两种假设：有机成因说和无机成因说。

(1) 有机成因说认为，石油是古代海洋或湖泊沉积物中的生物遗体有机质在温度和压力的作用下经过漫长的有机化学反应形成的。从生物遗体有机质到石油是一个漫长的过程，首先形成腊状的油页岩，然后在合适的温度压力条件下逐渐形成液态和气态的碳氢化合物。石油生成的“典型”的深度为 4~6km，深度过浅温度过低时形不成石油，深度过大温度过高时石油会裂解为天然气(图 1.1)。

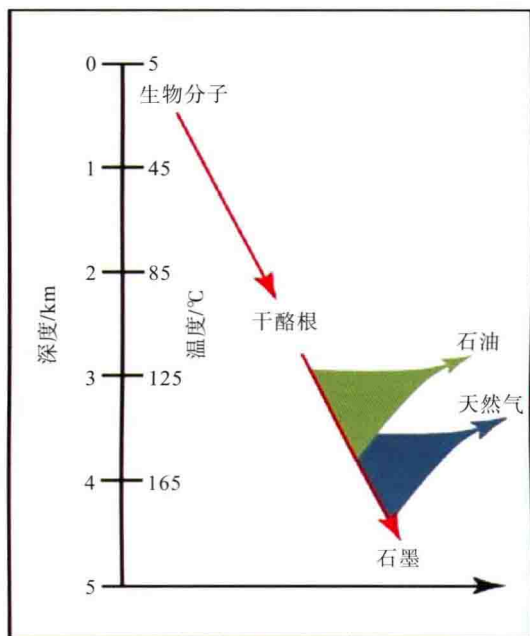


图 1.1 石油和天然气形成的温压条件

资料来源：Matthews(2008)

石油密度较小，相对较轻，形成以后会向近地表运移。现有研究表明，石油的形成至少可能需要 200 万年的时间。目前发现的油藏中，时间最老的可达到 5 亿年之久。

(2) 无机成因说认为世界上确实有一些油气田其烃总量之巨很难用生物成因说来解释一些油气是由地壳深部的碳氢化合物沿深大断裂向上迁移形成的，

(3) 一些学者认为，油气的有机成因和无机成因都存在，此为所谓的二元成因说。其实，无机成因说并不否认有有机成因石油的存在。而且现有证据表明，绝大多数的油气田都是有成因的。如果无机成因油气的存在，那它一定和区域

性的深大断裂有关,因而也有可能和地震活动有关。

海相地层中形成的石油称为海相石油,陆相地层中形成的石油称为陆相石油。世界范围内,大的油气田多产于海相地层,但我国最大的油田——大庆油田产于陆相地层。

1.1.2 天然气

天然气是一种以甲烷为主,赋存在地下岩石孔裂隙中的可燃气体。天然气通常是多组分的混合气体,主要成分是烷烃,其中甲烷占绝大部分,另有少量的乙烷、丙烷和丁烷;此外,一般还含有硫化氢、二氧化碳、氮和水气以及微量的惰性气体,如氦和氩等。

天然气的比重约为 $0.65\text{g}/\text{cm}^3$,比石油轻。其主要成分是甲烷(CH_4),它是最短最轻的烃分子,因比空气轻而易扩散到空气中。纯的天然气无色无味,无毒。但甲烷在空气中的聚集浓度达到 $5\%\sim 15\%$ 时会发生威力巨大的爆炸。因此,为帮助检测泄漏,销售的天然气中都加了硫醇(四氢噻吩),闻起来有刺鼻的气味。

天然气也属化石能源,但它在燃烧过程中产生的有害物质极少,产生的二氧化碳仅为煤的 40% 左右,是目前最重要的清洁能源。2013年,全世界开采天然气约 3.39 万亿立方米,我国开采逾 1170 亿立方米。2013年,我国天然气消费的对外依存度是 31.6% 。天然气主要用于生活和工业燃气,包括燃气汽车等,同时也是极为重要的化工原料。

天然气与石油生成过程既有联系又有区别(图 1.1)。石油主要由腐泥型有机质在深成阶段经由催化裂解形成,形成过程比较缓慢。天然气的原始物质比较多样化,除腐泥型有机质既生油也生气外,腐植型有机质主要生成气态烃。天然气的生成环境也相对更加宽泛,有机物质经过厌氧腐烂时就会产生富含甲烷的气体,石油经过高温裂解也能形成天然气,而且天然气的生成过程可以相当快地。

天然气的成因大致可分为生物成因气、油型气、煤型气和无机成因气。工业开采的目前主要是油型气、次为煤型气。页岩气也是天然气。煤型气、页岩气的储量有可能比常规天然气的储量还大。

(1)生物成因气指在成岩作用阶段的早期,在强还原条件下,沉积有机质经微生物的群体发酵和合成作用形成的天然气。生物成因气出现在埋藏浅、时代新和演化程度低的岩层中,几乎全由甲烷组成,其含量一般大于 98% 。

(2)油型气是沉积有机质,特别是腐泥型有机质,在热降解成油过程中与石油一起形成的天然气,或者是在后成作用阶段由有机质和早期形成的液态石油热裂解形成的天然气。油型气包括湿气(石油伴生气)、凝析气和裂解气。油型气的形成具有显著的垂直分带性,在浅部(成岩阶段)形成的主要是生物气,在深成阶段后期形成的主要是低分子量的气态烃($\text{C}_2\sim\text{C}_4$)(湿气),以及轻质液态烃在较高温压条件逆蒸发形成的凝析气。在深部,由于温度更高,生成的石油会裂解为小

分子的轻烃直至甲烷,有机质亦进一步生成气体。以甲烷为主的石油裂解气是油型气生成序列的最后产物,通常将这一阶段称为干气带。

(3)煤型气是指煤系有机质(包括煤层和煤系地层中的分散有机质)经热解生成的天然气。煤矿开采中常见的瓦斯就是煤系地层中形成以甲烷为主要成分的煤成气。煤型气一般为干气,也可能有湿气,甚至凝析气。煤型气也可形成特大气田。

(4)无机成因气包括以甲烷为主要成分的天然气和 CO_2 。无机成因天然气可能有两类形成方式:特定条件下的无机反应形成($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$)和封存在地幔中的地球原始大气中的甲烷等沿深大断裂或伴随火山活动等排出形成(即所谓的幔源气)。 CO_2 气也有两种形成方式:碳酸盐岩在高温条件下的分解和封存在地幔中的地球原始大气中的 CO_2 。

天然气的分布领域比石油广,产出类型和储集形式比石油多。天然气藏既有与石油聚集形式相似的常规天然气藏,如构造、地层、岩性气藏等;又可形成煤层气、水封气、气水化合物以及致密砂岩、页岩气等非常规的天然气藏。世界上已探明的天然气储量中,约有 90% 都不与石油伴生,而是以纯气藏或凝析气藏的形式出现,这表明天然气的成藏与石油的成藏规律可能有所不同。

天然气的地理分布很不均匀,世界天然气资源半数以上分布在俄罗斯和中东海湾地区。我国的天然气主要分布在鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、莺—琼盆地五大盆地。

1.2 油气藏

油气藏(oil/gas reservoir)是地壳内油气聚集的基本单元,是具有独立压力系统和统一的流体界面的单一圈闭。圈闭(trap)是由盖层(渗透率极低的岩层如泥岩、页岩或类似的地质构造如封堵性很好的断层、不整合面等)围限储层(高孔渗岩石)组合而成的油气聚集空间。圈闭中如果主要聚集了油,是为油藏;如果只有天然气,是为气藏;如果是气上油下的油气共存,是为油气藏。本书所称的油气藏如不加特别说明则泛指油藏、气藏和油气藏。

油气藏的类型较多,依据不同的分类标准可以划分出不同类型的油气藏。油气藏的分类主要依据圈闭类型划分。圈闭类型实际指的是油气的封存条件,表现为盖层和储层的不同组合形式。依据圈闭类型的不同可将油气藏划分为构造油气藏、岩性油气藏、水动力油气藏和复合油气藏四类,其中以构造油气藏和岩性油气藏最为常见与重要。

中国早在公元前 2 世纪就开始利用石油和天然气,但现代的油气成藏理论和勘探方法均诞生在美国^①。在各类油气藏中,最早被认识的是构造油气藏中的背

^① <http://www.bookrags.com/research/petroleum-history-of-exploration-woes-02/>.

斜油气藏(图 1.2),它也是最主要、最普遍、最易发现的油气藏类型。大约在 19 世纪中叶,美国宾夕法尼亚的油气勘探者即注意到了油气分布于背斜高点这一现象。1861 年,怀特(Israel Charles White)通过简易的物理模拟实验后提出了著名的背斜找油气理论。他认为,比重较轻的石油在地下岩层的水介质中受浮力作用始终趋向于自深向浅运移,它们在运移过程中遇到致密的盖层后将通过侧向运移汇集到构造高点形成背斜油气藏。1875 年前后,背斜成藏理论传到欧洲及世界各地并在实践中获得巨大成功,背斜控油气理论与背斜找油气方法的历史地位由此确立(庞雄奇等,2007)。

随着油气勘探的深入,在找到大量背斜油气藏的同时也发现了一些非背斜油气藏。继 1919 年在世界上发现第一个非背斜油藏之后,1930 年乔伊纳在东德克萨斯发现地层油藏。1934 年,威尔逊(J. Tuzo Wilson)提出了非构造圈闭(non-structural trap)的概念,用以指“由于岩层孔隙度变化而封堵的储集层”内形成的油气藏。1936 年,莱复生(A. I. Levorsen)提出地层圈闭(stratigraphic trap)的概念;1964 年,他进一步提出了“隐蔽圈闭”(subtle trap)一词,用以概括构造、地层、流体(水动力)多要素结合形成的复合圈闭。1972 年,哈尔鲍蒂(H. T. Halbouty)引用“subtle trap”的概念,用以指地层圈闭、不整合圈闭、古地形圈闭;同年,美国研究者罗伯特(E. K. Robert)编著出版了《地层油气田》一书,提出了隐蔽油气藏的勘探问题。至此,基本形成了现代对油气藏的基本认识:油气藏的类型是复杂多样的(图 1.2),是“必须依赖人的创造性想象思维和技术的感性应用所确定的任何钻探目标”^①。

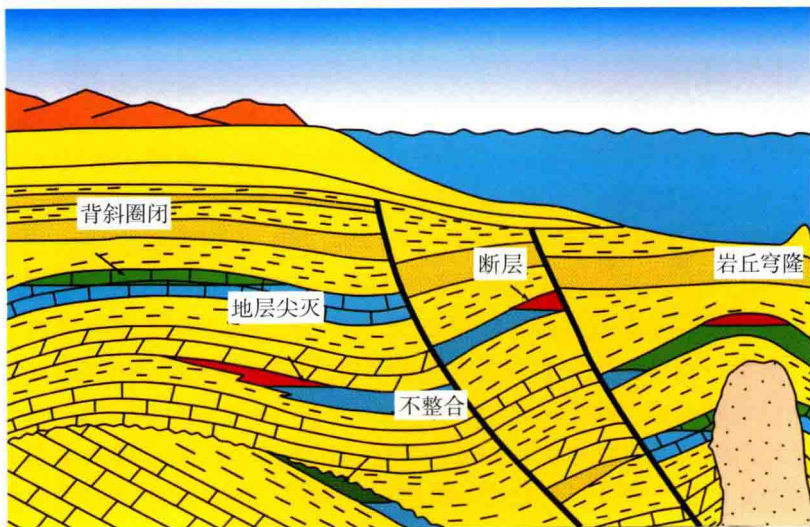


图 1.2 地层构造与油气藏示意图

资料来源: American Petroleum Institute(1986)

^① http://www.lw23.com/pdf_300777b8-f391-4908-8b57-0234e2a44e63/lunwen.pdf.

我国对隐蔽油气藏的研究始于 20 世纪 80 年代,代表性的著述有 1983 年中国石油学会石油地质专业委员会编辑出版的《中国隐蔽油气藏勘探论文集》,1986 年胡见义等编著的《非构造油气藏》,1998 年潘元林等主编的《中国隐蔽油气藏》,2004 年李丕龙等主编的《隐蔽油气藏形成机理与勘探实践》等。隐蔽油气藏已经成为我国油气勘探的重点领域。

非背斜隐蔽油气藏可以通称为复杂油气藏。复杂油气藏成因复杂,既包括岩性油气藏等非背斜构造油气藏,也包括不易发现的低缓背斜构造油气藏;储层类型和形态多样,既包括泥岩围限的砂岩透镜体,也包括生物礁滩、风化缝洞、古潜山、火山口等;油气水压力系统复杂,既可能是统一的流体压力系统,也可能是分离的油气水压力系统;油气封堵条件多样,既可能是不渗透岩层,也可能是断层、不整合面,甚至是水层。复杂油气藏可能是一个油气藏就是一个类型,因此认识和勘探难度都很大。经过几十年的大规模勘探,世界上绝大多数盆地规模较大的背斜构造基本上都进行过普查性勘探,可以说大型的背斜构造油气藏基本发现殆尽。现阶段,以及将来,油气勘探的主要目标是各类复杂油气藏,如岩性油气藏、生物礁滩油气藏、碳酸盐岩缝洞油气藏、古潜山油气藏、裂缝性油气藏、火山岩油气藏等。这些油气藏,更多的是依据储层的类型而非圈闭类型命名的。

此外,油气藏有时也用以泛指一个油气田的所有油气储集体。油气藏是计算储量的基本单元。储量=圈闭体积×储层孔隙度×油气饱和度。油气精细勘探的基本任务就是确定油气藏的这三个参数。

1.3 油气成藏

油气成藏(hydrocarbon accumulation)指油气的聚集成藏。油气成藏和油气藏是两个密切关联的概念。油气藏描述的是油气储集体(储层)及其地质环境(围岩),是特定油气成藏作用的结果;油气成藏描述的是油气藏的形成机制与过程,是油气藏存在的原因。油气藏的结构与特征是分析油气成藏机制与过程的基础与约束;油气成藏的理论与分析方法是研究预测油气藏结构的理论基础与实践指导。总的来看,油气藏是一个描述油气赋存状态的静态概念;油气成藏是一个描述油气运移机制与过程的动态概念。

油气成藏的机制与过程也就是油气迁移、聚集的机制与过程,本质上是一个岩石孔裂隙中的油气流体运移聚集的问题,在物理上就是一个强非均匀介质中的渗流力学问题。油气运移可以分为两类:初次运移和二次运移。初次运移或称一次运移指油气形成后自源岩中的析出与聚集成藏(图 1.3 中①);二次运移指油气藏中的油气的再迁移(图 1.3 中②),再运移可以发生多次。就确定的油气质点而言,初次运移和二次运移的先后顺序是确定的,但对于一个含油气盆地而言,

初次运移和二次运移常常是交替发生的，不能从时间上绝然分开。而实际上，油气运移贯穿油气生成、油气藏形成乃至破坏的全过程。油气初次运移与油气生成有直接联系，受烃源岩物理性质的影响也较大，因而常将生烃与排烃(即初次运移)一起研究；而油气二次运移多受过构造运动控制，受储集层岩石物性影响较大，二次运移的重要结果是油气聚集，因此常将油气的二次运移与油气聚散一起研究。

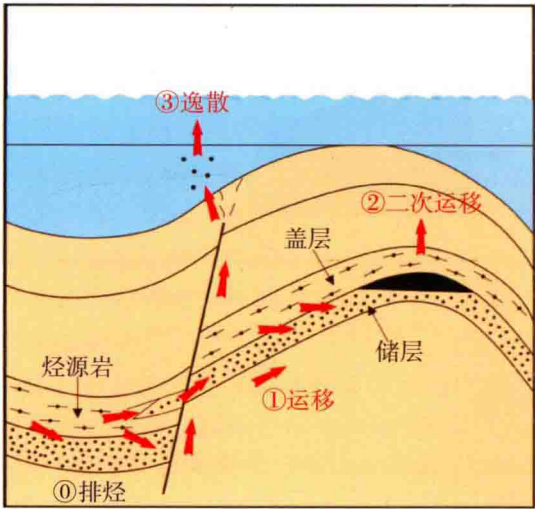


图 1.3 油气运移示意图

资料来源：Matthews(2008)

1.3.1 初次运移

初次运移(primary migration)主要和压排有关，压力主要是上覆岩层的垂向静压。地震的同震破裂对油气初次运移的影响有限，但孕震应力的影响可能较大。孕震应力通常表现为缓慢的侧向挤压。侧向挤压不仅有利于油气自烃源岩的排出，更有利于侧向的运移聚集。背斜成藏之背斜主要由侧向挤压形成。

烃源岩中的干酪根裂解形成的油气弥散在岩石孔裂隙中。随着埋深的增加和压实作用的进行，弥散在烃源岩岩石孔裂隙中的油气会逐渐被压挤排出，在高孔隙度的岩石(储层)中形成聚集(图 1.4)，形成有工业价值的油气藏。油气自烃源岩中被压挤排出的微观机制可能复杂而多样化的，一些油气成藏专著对此有详细的总结论述(A. 佩罗东, 1993；李明诚, 1994)。

烃源岩以富含有机质的泥岩为主，其原始沉积物以泥质(黏土矿物)为主，富含水。泥质沉积在深埋压实过程中，首先会挤出大量的水，孔隙度急剧减小。待埋深增加(伴随温度的升高)到石油开始形成时，烃源岩的孔隙度和渗透率已经很低，如无合适的烃源岩—储层空间组合，烃源岩中的油气是很难排出并聚集成藏

的。实际上,许多烃源岩(经历漫长的地质历史演化后,多数已经成为页岩)中仍残存有大量的天然气或油质。页岩气和油页岩开发的实际上就是这部分没有排除的油气。

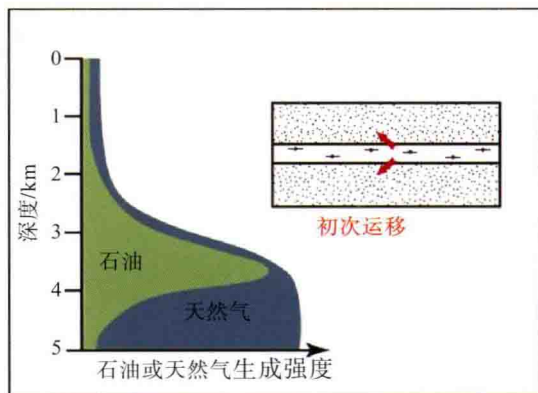


图 1.4 油气的初次运移

资料来源: Matthews(2008)

1.3.2 二次运移

二次运移(secondary migration)指已经聚集起来的油气再迁移,主要同构造活动有关,尤其是断裂。因为很多油气藏分布在断裂附近,甚至直接交截。关于断裂活动在油气二次运移中的作用,认识是有分歧的。针对一些油气田的油气藏分布在断裂带两侧这一事实,一些学者的解释是“断裂是油气运移的通道”,而另一些学者的解释则是“断裂是一个封堵性边界”。这两种完全不相容的解释似乎都有道理。作者研究团队的想法是:断裂在油气二次运移中的疏导与封堵机制都存在,只是发生在断裂演化的不同阶段。汶川地震表明,断裂活动有活动期与平静期之分。断裂的活动期持续时间很短,但断错速度和位移量均很大,表现为开启的流体运移通道;平静期持续时间很长,但断错速度和位移量均很小,表现为渗透率极低的封堵边界。在地质历史的绝大部分时段,断裂处于蛰伏状态,表现得很平静。但如果发生大地震,断裂会瞬间由平静期转入活动期。也就是说,断裂在油气二次运移中的作用与机制,同其是否为成震断裂或同震破裂有关。如果断裂是成震断裂或同震破裂,其作用以疏导为主;如果断裂处于平静期,则其作用以封堵为主。断裂因地震由平静期转入活动期,使其由油气运移的封堵性边界转换为疏导体系;活动期的断裂因应力的释放和同震破裂为矿物质的充填而逐渐转为平静期,使其由油气运移的疏导体系逐渐转化为封堵性边界。

关于油气的二次运移机制,有多种解释,包括渗透、超压突破、断裂疏导等。这些机制都是实际存在的,但依我们的分析,在成规模的油气成藏中,起主导作用的机制很可能是与地震破裂有关的断裂疏导。

1.4 油气成藏研究的历史与未来

研究油气成藏,除了认识自然现象之外,更重要的目地在于想顺藤摸瓜,即顺油气运移的路径,追寻油气藏的空间位置。油气成藏研究围绕两个互有关联的核心问题展开:①油气成藏的机理;②油气成藏的过程。油气成藏是一个由地质、物理、化学等多因素控制的复杂多相态特殊物质系统的演化过程,具有控制要素多、演化时间长、多种作用机制交织发挥作用、难以实验验证等特点。

自1861年加拿大地质学家亨特提出背斜成藏学说至今的一个半世纪中,油气地质学家对油气成藏的机理与过程进行了艰苦的探索,认识既有长足的进步,也仍有许多问题没有彻底解决(罗晓蓉,2008)。展望未来,必须以回顾历史为起点。在过去的半个世纪间,对油气成藏的认识经历了如下几个主要的阶段:

(1)1861年,加拿大地质学家亨特提出背斜成藏学说,认为其成藏机理与过程是油气在饱含水的地层内靠浮力向上倾方向的运移与聚集。亨特的背斜成藏学说开创了油气成藏的科学时代。

(2)20世纪初,随着非背斜油气藏的发现和对圈闭性质与特征的认识,逐渐认识到油气运移受流体动力控制,圈闭是油气运移的终点与聚集的场所,发展了非背斜圈闭成藏理论。

(3)20世纪50年代,通过对油气运移聚集过程中流体动力学的研究,确认了浮力、水动力和毛细管力是控制油气运移的主要因素。1953年,美国地质学家Hubbert提出了流体势的概念,建立了油气成藏的动力学机制模型与油气成藏过程的动力学研究方法。

(4)20世纪60年代后期,随着干酪根降解生油气学说的确立,促使将油气的生成、排出、运移和聚集成藏作为一个系统进行分析研究,形成了含油气系统的理论框架与分析方法。

(5)20世纪80年代以来,随着有机地球化学方法技术的进步,发展了油源层的鉴别方法技术、成藏期的鉴别与成藏年代确定方法技术、成藏过程及含油气系统数值模拟技术方法等,使油气成藏研究从定性走向了定量,从逻辑分析走向了勘探实践。

地球物质系统始终处于运动变化中。作为地球物质系统组成部分的油气也一直处于运移变化中。油气成藏是一个复杂的地质物理化学过程。油气能否运移以及运移结果是散还是聚,取决于诸多因素的时空配置,尤其是地压场、地温场、地应力场(“三场”)和源(岩)储(集)体的空间配置。因此,油气成藏研究不仅要分析含油气系统各组成要素,更要分析各组成要素的组合及组合变化。在初次运移阶段,主要的控制因素是含有有机质沉积的矿物与化学组成、沉积物的埋深速率及埋深(地压场、地温场)、烃源岩和储层的空间配置、垂直静压与侧向动压(地应

力场)的相对大小等。在二次运移阶段,主要的控制因素是动力(地应力场)、运移通道(源储体的空间配置)、相态、方向、距离以及运移时间和运聚效率等。

油气成藏是一个复杂的地质物理化学系统演化过程,影响因素甚多(如油气地质上的生、运、储、盖、保等;物理上的压力、应力、温度;化学上的温度、酸碱度、水岩反应、表面化学等,以及物理化学甚至微生物的所用等)。其空间尺度与演化速度变化很大(空间尺度变化可从纳米级至千米级;时间尺度变化可从秒至亿年),同区域地质构造及油气地质条件结合紧密,如何删繁就简地构造出油气成藏演化的数学物理模型,是一个极富挑战性的理论性研究课题;而如何将普适性的油气成藏演化模型与具体的油气地质条件相结合,在恢复目标区的油气成藏过程的基础上预测油气藏的分布,则是会反复被提出的实践性研究课题。

第 2 章 地震引起的地下水与油气异常运移

国内外都曾观测到地震引起的泉水出水量和地下水位快速变化。地震后泉水出水量既有增大的，也有降低的；地震后地下水位的变化也是如此，既有升高的，也有降低的。国内外也曾观测到过地震引起的油气生产井产量的剧烈变化和地震引起的油气溢出。分析地震引起的地下水和油气异常运移规律，对于理解地震控制的油气运移与成藏至关重要。

2.1 汶川地震引起的地下水异常运移

2008 年的汶川地震，引起了大范围的地下流体异常迁移，具体表现为：①龙门山许多泉水突然增大或减少；②川西平原多处出现喷水冒砂；③大范围的地下水位异常变化。

据作者研究团队实地调查，汶川地震后擂鼓镇石岩村的一个山泉，地震后涌水量大增，持续 2 个多月后逐渐减少。此一现象只有一个解释，是地震引起的。

汶川地震后，川西平原多处出现喷水冒砂液化现象，规模大小不一(图 2.1)。综合多源资料编绘的汶川地震后川西平原的液化点分布参见图 2.2。



(a)液化喷沙裂隙长约 1.5m

图 2.1 汶川地震后郫县某液化点实景(地震后 20 天)