



松辽盆地向斜油藏特征及成藏机理探讨

吴河勇^{①②*} 梁晓东^① 向才富^③ 王跃文^①

(① 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712; ② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

③ 中国石油大学(北京)资源与信息学院盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要 向斜区低-超低渗透油藏油水关系复杂, 重力分异作用不明显, 由坳陷中心向两侧表现为油藏-油水过渡带-正常油藏的特点. 通过对松辽盆地低-超低渗透储层中油气水运移方式、动力学条件和非达西渗流状态三方面的探讨, 认为滞留效应是石油在向斜低部位成藏的关键. 油气在低-超低渗透储层中运移时, 气、水以单个或几个分子结合的状态运移, 能够自由通过喉道, 而油珠的最小直径一般要大于喉道直径, 必须通过变形才能通过, 导致气、水优先运移, 而油珠运移滞留, 聚集成藏; 流体压力差和浮力是石油运移的主要动力, 毛细管力是石油运移的主要阻力. 当动力小于阻力时, 石油滞留成藏; 向斜油藏内部浮力小于毛细管阻力, 油水不能发生正常的重力分异. 这种在向斜区成熟烃源岩范围内低-超低渗透储层中形成的油藏属于非常规油藏.

关键词 油珠 孔喉 向斜油藏 低-超低渗透储层 滞留效应 非达西渗流

最早的背斜成藏是 T. S. 亨特在 1861 年提出的^[1], 提出了在背斜等构造高部位发生油气水重力分异的成藏模式, 背斜成藏模式一直为地质家们所遵循, 指导着勘探决策^[2~4]. 此后石油地质学经历了由传统的生-储-盖-圈-保等静态要素的分析, 发展到进一步强调各个静态要素和动态要素之间相互作用的含油气系统^[5]及面向成藏过程的成藏动力学^[6]的系统分析方法. 上述所有石油运聚理论均基于油气受浮力驱动并在构造或者地层岩性圈闭中不连续聚集(Discrete Accumulation)形成的油气藏. Law 等^[7]提出了非常规油气系统(Unconventional Petroleum System)的概念, 指出非常规油气系统与构造及地层岩性圈闭无关, 基本上不受重力分异作用的影响, 区域上存在大规模的普遍含油气区带, 并以某些天然气资源为例, 简述了煤层气^[8]、深盆气^[9]和天然气水合物^[10]等几种非常规天然气资源. 国内学者在本世纪开始的时候也注意到了坳陷中心低部位含油的情况, 但大多数人

认为是常规油气藏的岩性油藏, 并称之为满凹含油^[11]现象.

笔者从 1986 年开始在松辽盆地三肇凹陷扶杨油层(扶余、杨大城子油层, 图 1)勘探过程中发现, 在源岩高成熟区、高压排烃范围内均为大面积连续含油区, 致密层为干层, 不含水的现象占 90% 以上. 这种大面积连续含油现象与构造圈闭及常规的地层岩性圈闭明显不同, 随后这种现象在鄂尔多斯盆地^[12]和渤海湾盆地^[13]也见报道. 笔者认为石油在低-超低渗透输导层(低渗透油层平均渗透率 $(50 \times 10^{-3}) \sim (10.1 \times 10^{-3}) \mu\text{m}^2$; 特低渗透油层平均渗透率 $(10 \times 10^{-3}) \sim (1.1 \times 10^{-3}) \mu\text{m}^2$; 超低渗透油层平均渗透率 $(1.0 \times 10^{-3}) \sim (0.1 \times 10^{-3}) \mu\text{m}^2$)^[14]中运移时, 由于油珠直径大于孔喉直径, 必须变形才能通过喉道, 同时气、水由于分子直径较小易于优先通过, 结果造成油珠落在最后而逐渐滞留下来, 这种滞留效应是决定其在生油坳陷向斜部位形成非常规油藏的关键. 石油向斜成藏现象及其

成藏机理的研究和应用突破了常规油藏中石油只在构造和地层岩性圈闭中聚集的勘探思路,提出石油可以在向斜区内连片聚集成藏的观点,将大大拓展找油领域。

1 松辽盆地地质特征

松辽盆地位于郯庐断裂带的西部,地跨中国东北三省及部分内蒙古自治区,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,孕育了世界上最大的陆相油田——大庆油田。松辽盆地主要沉积了中、新生代的沉积岩系,最大沉积厚度超过了 10000 m,地层自下而上依次为白垩系、古近系、新近系和第四系。盆地具有典型的下断上坳的双层结构,早白垩世登娄库期之前为盆地的裂陷演化阶段,主要复理石沉积和火山碎屑岩建造。泉头期-嫩江期为盆地的坳陷演化阶段,沉积了三套半深湖—深湖相泥岩与滨浅湖—河流相砂砾岩,是盆地主要的生烃源岩与储集层。嫩江组沉积之后盆地整体抬升剥蚀,进入萎缩褶皱阶段,沉积中心不断向西迁移,主要为河流相沉积。盆地内划分了五个含油气组合,中、下部含油气组合是盆地的主要勘探对象(图 1)。

2 松辽盆地向斜油藏特征

松辽盆地是大型陆相含油气盆地,随着石油勘探的发展,发现了越来越多的传统石油运聚理论无法解释的地质现象,主要表现在向斜中心大面积含油,并且油水关系倒置及重力分异作用不明显等现象在向斜区内普遍存在,不能用差异聚集原理来解释。

2.1 向斜中心大面积含油

松辽盆地继在大庆长垣等背斜部位发现大规模的石油地质储量之后,在盆地的向斜区也发现了大规模的石油地质储量,累计探明石油地质储量超过 12 亿吨,对大庆油田的稳产、高产作出了重大贡献。据统计,与构造及地层岩性圈闭无关,重力分异作用不明显,以滞留成藏为主的占 87%(图 1),属非常规油气系统。以盆地西部的他拉哈-常家围子向斜葡萄花油层为例,已经发现了多口高产工业油流井,如古 88 井日产油可达 100 m^3 以上。随着勘探向坳陷中心的挺进,向斜中心部位的含油面积逐渐扩大并成带成片出现。

从所发现的油藏储层物性分布范围来看,常规油藏和向斜油藏差异明显。前者(如大庆长垣)主要分

布在渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的范围内,而向斜中心含油范围主要集中在渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的范围内。但是从沉积环境和沉积相构成上来看,葡萄花油层在大庆长垣和古龙凹陷差别并不明显,如两者的含砂率均在 20%~40% 之间。对同一套储层来说,油气水重力分异将形成下水上气中间油的空间分布格局,油气藏具有统一的油水边界。而松辽盆地生烃坳陷区由向斜向两侧表现出:向斜中心为滞留油藏带,向两侧过渡为半滞留的油水过渡带和背斜部位的常规油气藏带(图 2)。

2.2 油水关系倒置

松辽盆地古龙凹陷葡萄花油层油气水关系统计发现 53% 的油藏属于向斜油藏,出现水层、油水层在油层之上的现象,油藏不具有边水和底水,而渗透性较好的背斜部位及砂岩透镜体或岩性尖灭的油藏不存在同一砂体内的油水关系倒置现象。

3 石油在向斜部位成藏的机理探讨

松辽盆地古龙凹陷葡萄花油层低-超低渗透储层连片含油和油水关系倒置的现象说明该油藏属于非常规油藏。笔者认为,滞留效应是该类非常规油藏成藏的关键,下面从油气水运移方式的差异性、动力学条件和渗流状态三方面对滞留的机理进行探讨。

3.1 油气水运移方式差异

气、水及油珠在低-超低渗透储层中发生渗流的方式是不同的。气和水一般以单个或几个分子结合的状态运移,其直径一般要小于低孔低渗储层的最小孔喉直径(松辽盆地葡萄花油层低-超低渗透储层平均孔喉直径: $n \times 10 \sim n \times 100 \text{ nm}$),而石油则以多种有机高分子油珠形式运移,其油珠的最小直径受原油物性控制($n \times 100 \sim n \times 10000 \text{ nm}$)^[15],一般要大于此类储层的孔喉直径。在运移过程中,油珠在通过小孔喉时受阻,必须通过变形才能通过或者不能通过,而气水却能自由通过。这种油珠与气、水分子直径的差异是导致油珠在低孔渗储层中滞后甚至停留的主要原因。

油珠在运移过程中,所受的阻力除与原油物性有关外,还与孔隙结构的非均质性有着密切关系,主要受以下 3 种作用力的作用:第 1 种是由毛细管的直径变化造成的,方向指向毛管孔隙直径增大的方向;

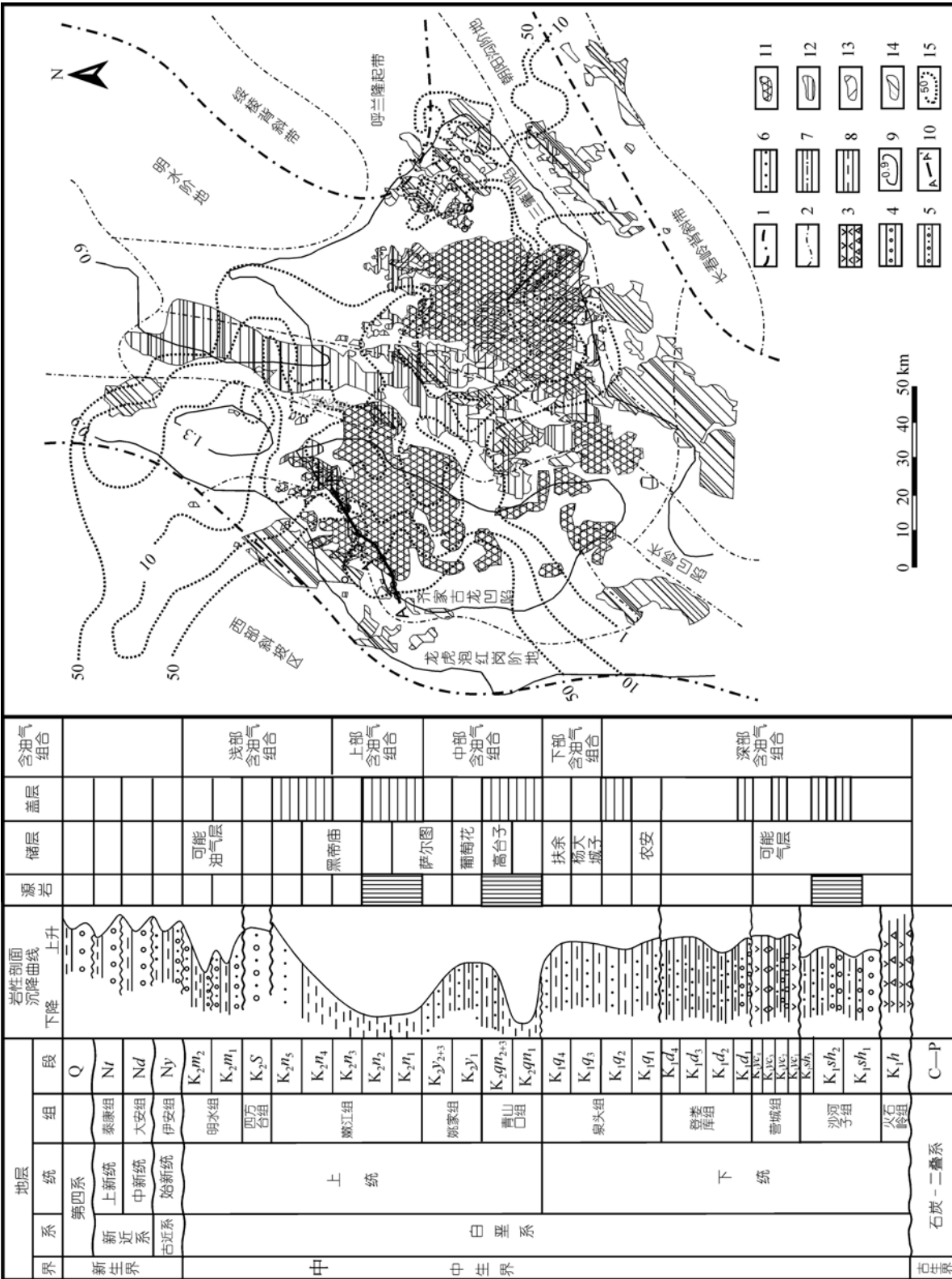


图 1 松辽盆地地质特征与石油向斜成藏现象

1.一级构造线; 2.二级构造线; 3.火山岩与火山碎屑岩; 4.砾岩; 5.砂砾岩; 6.砂岩; 7.砂质泥岩; 8.泥岩; 9.青山口组源岩镜质体反射率等值线; 10.油藏剖面(图 2)位置; 11.葡萄花油层向斜油藏区; 12.葡萄花油层构造及地层岩性油藏区; 13.扶余油层构造及地层岩性油藏区; 14.扶余油层渗透率等值线($\times 10^{-3} \mu m^2$)

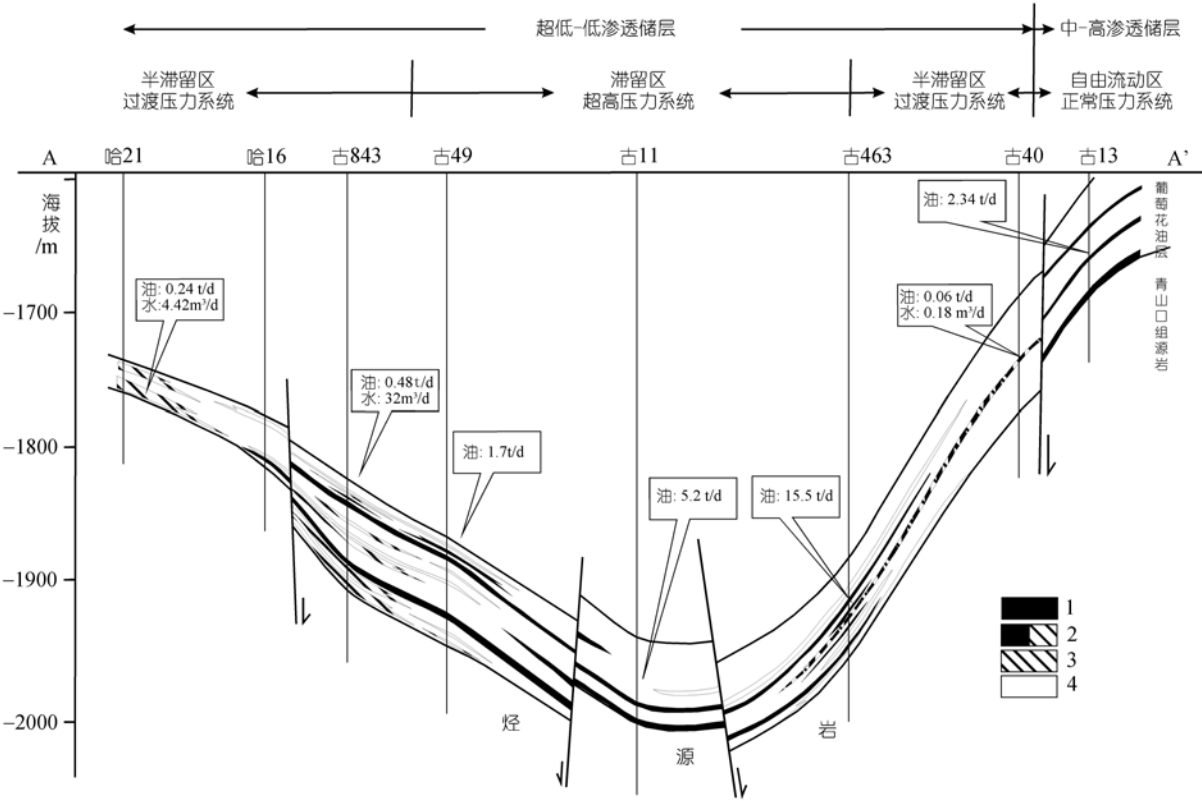


图 2 松辽盆地北部他拉哈-常家围子向斜葡萄花油层油藏剖面图
1.油层; 2.油水同层; 3.水层; 4.干层

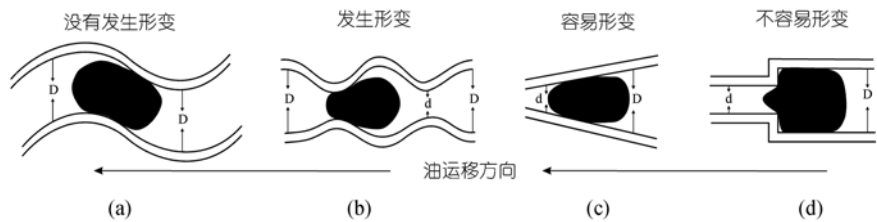


图 3 油珠在不同孔喉结构中运移的形变示意图

第 2 种是非润湿相(一般情况下是油)运动所产生的润湿滞后造成的, 主要由非润湿相在孔隙喉道中的前进和后退接触角不同产生的, 总是阻碍非润湿相的运动; 第 3 种作用力的方向垂直于毛细管壁指向非润湿相, 即对非润湿相的压力, 和运动摩擦力及非润湿相的形变有关^[16]. 当孔喉直径小于非润湿相油珠直径时, 在运动过程中, 非润湿相被迫发生形变, 非均质性越强, 原油物性越差, 阻力越大(图 3). 图 3(a)与 (b)相比, 前者油珠在运移过程中由于孔隙直径不变, 第 3 种力为零, 而后者由于孔隙直径变化而存在第 3 种力; 图 3(c)和(d)则反映了孔喉直径前后变化一致, 但前者孔隙结构的变化连续, 因而此时前者受到的

第 3 种作用力小于后者.

3.2 成藏动力学条件

浮力(F)、盆地内部流体压力差(ΔP)和毛细管力(P_c)三者控制着油驱水的动态过程, 前两者是石油运移的动力, 而毛细管作用力总是阻碍非润湿相的运动. 石油运移的动力和阻力的相互关系决定了石油是否发生滞留, 而盆地内部流体压力差、浮力及其与毛细管力的大小决定了油水能否发生重力分异. 这种复杂的动力学过程可以借鉴 Berkenpas 对气水关系倒置的动力学模型^[17]来说明.

石油在储层中的运移是油驱替水的过程, 当油

运移的动力(盆地内部流体压力差)不足以克服其阻力(油珠形变通过小孔隙)时发生滞留作用。石油向上倾方向运移的动力条件是不断变化的: 在向斜低部位, 储层中几乎没有自由水, 浮力几乎不起作用, 当流体压力差不足以克服阻力时, 石油发生滞留作用, 一般产纯油或含少量乳化水(图 4(a)段), 相当于图 2 中的滞留区; 当流体压力差大于阻力时, 石油开始向上倾方向运移; 随着石油向上倾方向运移, 流体压力差逐渐变小, 同时储层的孔渗条件变好, 阻力逐渐减小。在石油运移动力和阻力的这一复杂变化过程中, 会逐渐过渡到动力与阻力相互平衡的状态, 即滞留作用和非滞留作用的过渡带(图 4(b), (c)段和图 2 中的半滞留区)。该带之下石油发生滞留作用, 该带之上石油进一步向上倾方向运移, 形成常规油气藏(图 4(d)段、图 2 中的自由流动区)。

油气水是否能发生重力分异取决于浮力和毛细管力的相互作用。在向斜低部位, 油珠所受到的浮力作用远小于毛细管阻力作用, 因而不存在重力分异。随着油珠向上倾方向运移, 储集层中出现可动水并逐渐包围油珠, 同时喉道直径也逐渐增大, 油珠所受的毛细管阻力逐渐减小。当浮力大于毛细管阻力时就发生油水重力分异。

3.3 渗流状态

地下流体渗流理论认为达西渗流的渗流速度与压力梯度呈线性关系, 而低速非达西渗流的流体运移速率与压力梯度是非线性关系, 存在一个启动压力梯度^[18]。上述运移动力分析说明低-超低渗透储层中油珠只有克服阻力时才能运移, 即油珠运移存在启动压力梯度, 表明这种渗流为非达西渗流。油珠的低速非达西渗流加剧了低-超低渗透储层中石油的滞留效应。传统的石油运聚理论中使用的流体理论是建立在达西渗流理论之上的, 随着油藏的勘探由高孔高渗油藏逐渐走向低孔低渗油藏, 深入了解石油在多孔介质中的低速非达西渗流及相应的石油滞留效应成为必然。吴景春等^[19]对松辽盆地低渗透-超低渗透储层(渗透率 $0 \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的渗流模拟实验也表明这些储层都具有低速非达西渗流特征。

4 讨论

石油向斜成藏机理与传统石油运聚机理所适用的范畴不同, 向斜成藏机理适用于低-超低渗透储层, 在松辽盆地向斜区一般渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而传统石油运聚机理适用于中-高渗透储层, 因此石油

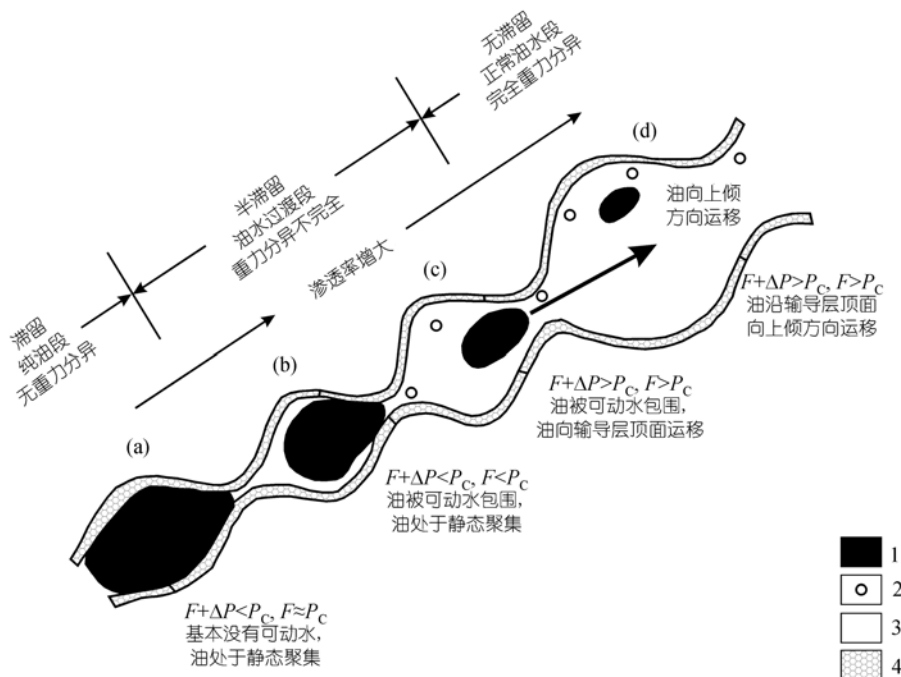


图4 向斜滞留成藏理论模型

据 Berkenpas^[17]修改. 1. 油; 2. 气; 3. 可动地层水; 4. 边界层(不可动的束缚水). F : 浮力; ΔP : 盆地内部流体压力差; P_c : 毛细管力

表 1 常规与非常规石油运聚成藏机理对比表

分类	常规油气藏 (油水重力分异)	非常规油气藏 (无油水重力分异或分异不完全)	
	传统石油运聚成藏机理	石油向斜成藏机理	深盆地
适用范围	高-中渗透储层	低-超低渗透储层	低-超低渗透储层
成藏动力	浮力, 相对低势区聚集成藏	流体压力差, 相对高势区聚集成藏	天然气异常压差、浓度差, 相对低势区成藏为主
渗流方式	达西流	低速非达西流	浓度扩散
源-藏关系	源-储层-油藏 间接连通即可	低-超低渗透储层在源岩排烃范围内 储层(油藏)直接连通	致密储层在源岩排烃范围内 储层(油藏)直接连通
驱替原始水方式	从圈闭自上而下	由低部位向高部位	由低部位向高部位
成藏区域构造部位	区域构造高部位	多为区域构造低部位斜坡、向斜区内	多为区域构造低部位向斜区内
圈闭方式	构造、地层岩性圈闭	储层孔喉直径小, 油珠发生半滞留-滞留	水动力圈闭,地层岩性圈闭 和构造圈闭均可, 动态的聚-散平衡
油水分布	油水重力分异好, 有边水、底水	无边底水、分异差,石油含 乳化水, 部分含游离水	气水分异不好, 无明显底水
开采方式	底水驱动、弹性驱动	流体压力差驱动、弹性驱动	天然气浓度差驱动
开发注水方式	近平衡注水	超平衡注水	天然气压降开采(不注水)

向斜成藏机理是对传统石油地质理论中成藏机理的补充.

4.1 石油向斜成藏机理与传统石油运聚成藏机理的对比

石油向斜成藏是在低-超低渗透储层中形成非常规油气藏, 与传统的石油运聚成藏机理的对比见表 1. 向斜成藏机理是在低-超低速非达西流运移条件下, 油在流体压力差的驱动下在低-超低渗透层中滞留成藏, 而传统石油运聚理论的成藏机理是在达西渗流条件下, 油在中-特高渗透层中差异聚集成藏. 从成藏部位来说, 传统石油运聚理论认为油在构造高部位或者地层岩性中成藏, 一般为相对的流体低势区, 而向斜成藏机理认为石油在盆地中心向斜低部位成藏, 一般为相对的流体高势区, 常伴随有超压现象. 同时两者在渗流机理上的差异决定了两者开采方式上的差异, 相关机理仍需进一步探讨.

向斜成藏与地层岩性油藏的区别首先是常规油藏与非常规油气藏的区别. 从成藏机理上来说, 常规地层岩性油藏的勘探依然是以研究达西渗流为主, 强调被盖层、烃源岩或其他非渗透性岩层包裹的储集岩透镜体、上倾岩性尖灭等, 强调圈闭在垂向和侧向封堵性; 而石油向斜成藏只强调石油在低-超低渗透储层中的滞留作用. 只有当流体压力差超过低速非达西渗流所要求的压力时, 石油才发生渗流作用, 由相对高势区向相对低势区运移.

4.2 向斜油藏与深盆气的对比

石油在低-超低渗透储层中运移的滞留效应是石

油向斜成藏的关键, 而天然气分子直径小, 运移状态以浓度扩散作用为主, 聚-散的动态平衡^[20,21]是深盆地成藏的关键. 深盆地运移中的两个动态平衡过程是流体压力与毛细管压力的动态平衡以及天然气供给与天然气散失的动态平衡. 深盆地研究中没有发现石油在盆地中心聚集成藏的现象, 可能是埋藏到一定深度之后石油容易进一步裂解成天然气的原因.

5 结论

(1) 向斜油藏是石油在向斜低部位低-超低渗透储层中非达西渗流产生的滞留效应所形成的非常规油藏.

(2) 低-超低渗透储层中油气水的运移方式不同. 气、水以单个或几个分子结合的状态运移, 能够通过孔隙喉道, 而油珠的最小直径一般要大于喉道直径, 必须通过变形才能通过, 导致气、水优先运移, 而油珠运移滞后或停留.

(3) 向斜成藏的动力主要是盆地内部流体压力差、浮力和毛细管力. 前两者是石油运移的动力, 而毛细管力是石油运移的阻力. 当动力小于阻力时, 石油滞留成藏. 向斜油藏内部由于浮力小于毛细管阻力, 不能发生正常的重力分异.

致谢 本文在研究和完成期间得到了贾承造院士、李思田和李明诚教授等的悉心指导; 文章修改过程中, 与韩大匡、邱中建院士、查全衡、金之钧、赵文智、庞雄奇教授和杨长春研究员等进行了深入探讨, 在此一并表示诚挚的感谢.

参 考 文 献

- 1 诺斯 F U. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社, 1994. 12—19
- 2 Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. AAPG Bull, 1979, 63: 723—760
- 3 Dembicki H J, Anderson M J. Secondary migration of oil experiments efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits. AAPG Bull, 1989, 73: 1018—1021
- 4 Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three dimensional model. AAPG Bull, 1997, 81: 1451—1481[DOI]
- 5 Magoon L B. The petroleum system a classification scheme for research, resource assessment, and exploration (abs.). AAPG Bull, 1987, 71(5): 587
- 6 Perrodon A. Dynamics of oil and gas accumulations: Pua. Elf Aquitaine, 1983, 187—210
- 7 Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1851—1852
- 8 Ayers Jr W B. Coalbed gas systems, resources, and production and review of contrasting cases from the San Juan and Powder River basins. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1853—1890
- 9 Law B E. Basin-centered gas systems. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1891—1915
- 10 Collett T S. Energy resource potential for natural gas hydrates. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1871—1992
- 11 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论——内涵与意义. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5—13
- 12 杨华, 窦伟坦, 喻建, 等. 鄂尔多斯盆地低渗透油藏勘探新技术. 中国石油勘探, 2003, 8(1): 32—40
- 13 张小莉, 查明, 王鹏. 单砂体高部位油水倒置分布的成因机制. 沉积学报, 2006, 24(1): 148—152
- 14 闵琪, 金贵孝, 荣春龙, 主编. 低渗透油气田研究与实践. 北京: 石油工业出版社, 1998. 1—5
- 15 李明诚. 石油与天然气运移. 第三版. 北京: 石油工业出版社, 2004. 29, 33, 78, 193
- 16 王志欣. 毛细管力是油(气)初次运移的动力吗? 石油实验地质, 2000, 22(3): 9
- 17 Berkenpas P G. The Milk River shallow gas pool: Role of the undip water trap and connate water in gas production from the pool. SPE, 1991, 219—229
- 18 Alvaro P, Faruk C. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient. J Pet Sci Eng, 1999, 22(4): 237—240[DOI]
- 19 吴景春, 袁满, 张继成, 等. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非线性渗流特征. 大庆石油学院学报, 1999, 23(2): 82—85
- 20 Williams K E, Lerche I, Maubeuge F. Unconventional gas traps: Low permeability sands and gas accumulations. Energy Explor Exploit, 1998, 16 (1): 1—87
- 21 Pang X Q, Jin Z J, Zeng J H, et al. Prediction of the distribution range of Deep Basin Gas accumulations and application in the Turpan-Hami basin. Energy Expl Exploit, 2002, 20 (2-3): 253—286[DOI]