

文章编号: 0253-9985(2007)02-0209-07

砂岩透镜体成藏的动力学机制

李明诚¹, 单秀琴², 马成华³, 胡国艺³

(1. 中国地质大学, 北京 100083 2. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发科学研究院, 北京 100083
3. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发科学研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 砂岩透镜体的成藏动力学机制是一个还没有完全解决的问题。四周为生烃泥岩所包围的砂体是一个封闭或半封闭的水力系统, 烃类如何充注进去而孔隙水又如何被排替出来, 就成为问题的关键和难点。在对比岩性和构造圈闭成藏特征的基础上, 对泥岩中初次运移的动力和砂体中二次运移相态的转换以及浮力的作用进行了综合研究和动态分析。认为充注的动力主要是异常高压、毛细管压差、分子扩散和渗透压力; 在砂体中油气聚集和排水的动力主要是浮力及其产生的附加压力。这些成藏动力随生烃泥岩热演化阶段的不同, 也有所侧重和不同。在低熟阶段主要是压实和渗透水流的充注; 在成熟阶段主要是以烃-水两相渗流、毛细管压差和分子扩散等方式进行充注, 同时在浮力作用下油气在砂体中开始聚集; 在高成熟阶段除继承上述充注方式外, 同时又不断有天然气从砂体顶部扩散出来, 最终导致砂体中以油相聚集为主。影响砂岩透镜体成藏的地质要素是生烃泥岩的质量、厚度以及砂体的物性和产状。总之, 砂岩透镜体成藏要比构造圈闭成藏困难得多。

关键词: 砂岩透镜体; 成藏动力学; 油气充注; 异常高压; 毛细管压差; 分子扩散

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Dynamics of sand lens reservoir

Li Mingcheng¹, Shan Xiuqin², Ma Chenghua³, Hu Guoyi³

(1. China University of Geosciences, Beijing, 100096 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing, 100083 3. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007)

Abstract The dynamic mechanism of petroleum accumulation in sand lens remains poorly understood. Therefore, an explanation is still needed to address the key issue concerning how hydrocarbons charged into and expelled from the closed or semi-closed hydraulic system made of sandstones encircled by source mudstones. By comparing the characteristics of lithology and the reservoiring features of structural traps, a comprehensive study and dynamic analysis was carried out on the driving forces of the primary hydrocarbon migration and the phase transformation and buoyancy effect during the secondary migration in mudstone. The results show that the predominant charging forces include abnormally high reservoir pressure, capillary pressure difference, molecular diffusion, and osmotic pressure, and that the buoyancy and relevant additional pressure contribute greatly to hydrocarbon accumulation and water displacement in sandbodies. These dynamics vary with different evolution stages of source mudstones. The compaction and seepage water dominated the charging during low maturity stage, while in mature stage, two phase flow (hydrocarbon and water seepage), capillary pressure difference, and molecular diffusion, controlled the charging process, and hydrocarbons entered into the lens by the action of buoyancy. In the highly matured stage, the charging process continued and was further accompanied by natural gas diffusion from the top of sandbodies, resulting in a final oil accumulation in the lens. Factors that affect the sand lens reservoirs include the quality and thickness of source mudstone, and the physical properties and occurrence

收稿日期: 2007-02-25

第一作者简介: 李明诚 (1935—), 男, 教授, 油气运移及成藏动力学

of the sandbodies. In summary, hydrocarbon accumulation in sand lens is much more difficult than that in structural traps.

Key words sand lens; reservoiring dynamics; oil-gas charging; abnormally high reservoir pressure; capillary pressure difference; molecular diffusion

随着勘探程度的不断提高,大型构造圈闭油气藏的发现机率越来越小,岩性地层圈闭油气藏的勘探日益重要,目前在我国每年新增油气储量中即将占到 50%^[1]。尽管在实践中对岩性地层圈闭油气藏的勘探已总结出一套经验和方法,但对生烃泥岩中砂岩透镜体成藏的动力学机理,目前还不是十分清楚,从而在一定程度上制约了对该类岩性油气藏的有效勘探。因此,进一步探讨砂岩透镜体成藏的动力学机制,无论是在基础理论研究上,还是在油气勘探实践上都具有重大意义。

生烃泥岩中的砂岩透镜体油气藏是典型的岩性油气藏,其储集体可以是河道砂、滨外砂、浊积砂等沉积砂体,其外形可以是透镜状、条带状或其他不规则形状。砂岩透镜体油气藏早在 20 世纪 30 年代就已有发现^[2],对其成因也做过不少的研究,其中最有影响的是 Cordell(1977)提出的压实流聚集模式(图 1)^[3]。但该模式单靠砂、泥岩的差异压实是不能完全解决砂岩透镜体中油气富集成藏的问题,从而给人们留下许多质疑和思考。此后不少国内外学者分别从诸如:由于砂、泥岩孔隙大小差产生的毛细管压力差,烃浓度差产生的分子扩散,盐度差产生的渗透压力等不同的成藏动力去解释它的成因^[4-6]。笔者(2004)在对比了岩性圈闭油气藏和构造圈闭油气藏的成藏特征基础上,从泥岩中初次运移的相态和动力,到砂岩中二次运移相态的转变以及游离相油气所产生的浮力等多种运移相态和动力,对砂岩透镜体成藏进

行了综合的动态分析^[7],并提出影响其成藏的各种地质要素。

1 岩性圈闭与构造圈闭成藏特征的比较

1.1 圈闭的形成

岩性圈闭(砂岩透镜体)的形成,主要受沉积相和沉积条件控制;而构造圈闭(背斜)主要受地层褶皱和断裂等构造活动控制。

1.2 水动力系统

四周为泥质岩所包围的砂岩透镜体圈闭主要是一个封闭或半封闭的水动力系统,与外界只有微弱的水交换;而背斜构造圈闭往往是储集层的一部分,其本身主要是一个开放的水动力系统。

1.3 油气的充注

油气从四周生烃泥岩向砂岩透镜体中充注,具初次运移的特征,是异常高压、毛细管压差、分子扩散和渗透压力等多种动力综合作用的结果;而油气向背斜圈闭中充注,具二次运移的特征,主要是在浮力和水动力作用下油气运移的结果。

1.4 油气的聚集

油气在圈闭中的运移称之为聚集,是油气在圈闭中不断富集,含烃饱和度不断提高的过程。笔者认为无论是在砂岩透镜体圈闭还是背斜圈闭其聚集的主要动力都是浮力,最终表现为油气按重力分异。

1.5 圈闭中水的排出

油气在圈闭中聚集的同时,相应要排出同体积的水,砂岩透镜体孔隙中的水早期主要是从上

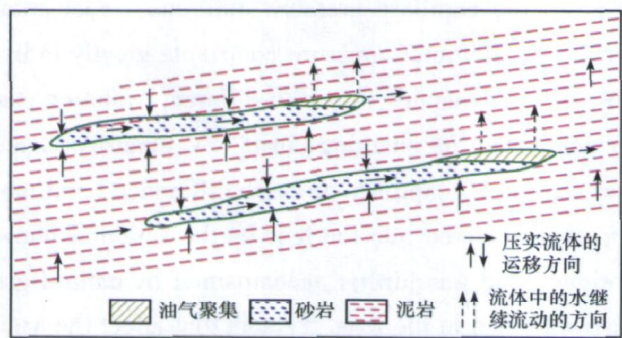


图 1 岩性圈闭中油气聚集的可能模式^[3]

Fig. 1 Possible modes of hydrocarbon accumulation in lithologic traps

方排出,当聚集了一定的油气后则主要是在浮力作用下从紧邻烃-水界面下的边部排出且随其下移而变动;背斜圈闭中的水除初期从顶部排出外,主要是从构造溢出点排出。

1.6 成藏要素

砂岩透镜体能否成藏,除要求与背斜圈闭相同的一般成藏要素(生、储、盖、圈闭等)外,对四周生烃泥岩的质量和成熟度以及它本身的产状都有相对较高的要求。

1.7 油气藏的保存

砂岩透镜体一旦成藏就不易遭到各种地质作用的破坏,在自然条件中保存的时间比构造圈闭油气藏要长,根据 Macgregor(1996)对全球 350 个大油田中不同圈闭类型的生存年龄进行了估算,岩性圈闭油气藏的生存年龄平均为 75 Ma 远远高于构造圈闭油气藏平均的 25 Ma^[8]。

通过上述比较不难看出,虽然砂岩透镜体与背斜构造圈闭的成藏条件与过程有许多不同之处(表 1),但有一个重要的共同点就是它们都主要依靠轻柱浮力的附加压力来排驱圈闭中的孔隙水,最终富集成藏。正是因为这一点砂岩透镜体仍属于常规油气藏^[9]。

表 1 岩性圈闭与构造圈闭的成藏特征比较
Table 1 Comparison of reservoiring features
in lithologic traps and structural traps

成藏特征	岩性圈闭(砂岩透镜体)	构造圈闭(背斜)
圈闭形成	以沉积因素为主	以构造因素为主
水力系统	封闭或半封闭	开放
油气充注	主要是初次运移	主要是二次运移
油气聚集	以烃柱浮力为主	以烃柱浮力为主
水的排出	主要从烃-水界面处	主要从构造溢出点
成藏要素	对烃源岩的质量和砂体的产状都有较高的要求	一般成藏条件
油气藏保存	不易遭到各种地质作用的破坏	相对易于遭到破坏

2 砂岩透镜体圈闭的成藏动力分析

烃类要在砂岩透镜体中富集成藏,就必须把其中的孔隙水排替出来;如果水排替不出来,烃类

也就充注不进去,更不可能富集成藏。可见砂岩透镜体的成藏机理就是要解决如何排出其中孔隙水的问题。然而,砂岩透镜体四周为生烃泥岩所包围,泥岩中生成的烃类怎样进入圈闭,而其中的孔隙水又如何排出到泥岩,就成为砂岩透镜体成藏的症结所在,也是人们长期不解的难题。笔者认为只有根据砂岩透镜体的成藏特征,进行成藏动力的综合分析和动态研究,才有可能解决这一难题。

2.1 充注的动力

泥岩中的烃向砂岩透镜体中充注的动力主要有以下几个方面。

2.1.1 异常高压

由砂、泥岩间差异压实所产生的瞬时超压和泥岩生烃所产生的超压是泥岩中含烃流体向砂岩透镜体充注的主要动力。由于差异压实所产生的超压主要发生在成岩初期,埋深一般小于 2 500 m,此时烃类生成不多,泥岩孔隙中含油饱和度还很低,很难达到油-水两相运移的饱和度,虽可使地层水发生流动,但对油气相的直接充注贡献不是很大。由生烃作用所产生的超压与油气大量生成同时发生,且贯穿在整个生烃的晚期成岩阶段。因此,生烃超压不仅是地层水流动的动力,对油气充注的贡献也最大。

众所周知,泥岩的压实和生、排烃作用具有幕式特征,由此产生的超压也呈幕式,而砂岩透镜体又是个封闭体系,随着超压流体的充注,砂体内外的压力很快达到平衡而停止充注;只有当泥岩中的超压再次产生并大于砂体内部压力时,油气的充注才又开始,结果在幕式超压的作用下相应形成幕式充注。

2.1.2 毛细管压力

非润湿相油气在多孔介质中运移,所产生的毛细管压力主要表现为毛细管压力差,其大小取决于介质的孔喉半径差。对油气运移来说毛细管压力差是动力还是阻力,则决定于运移的方向;当油气从小孔喉向大孔喉中运移或从泥岩向砂岩中运移,此时毛细管压力差主要表现为动力;相反方向的运移则表现为阻力^[7]。因此毛细管压力差是泥岩中油气向砂岩透镜体充注的动力,也是油气

滞留在砂体中圈闭聚集的原因。可见,毛细管压力是重要的成藏动力。

2.1.3 分子扩散

由烃浓度差产生的分子扩散,也是烃类(特别是天然气)充注的一种动力。生油岩中生成的油气,在烃浓度差作用下向砂岩透镜体中进行分子扩散,进入砂体的烃分子在较大的孔喉空间中聚集成具有相态的游离烃,与其他方式进入砂体的油气汇合在一起,加大了烃柱的高度和含烃饱和度^[10]。在重力分异作用下天然气聚集在砂体的顶部,当其浓度大于四周生烃泥岩时即又向外扩散,这可能也就是砂岩透镜体最终以油相聚集为主的原因。

2.1.4 渗透压力

由盐度差产生的渗透压力也是烃类充注的一种动力。砂体中的盐度一般高于泥岩^[7],结果泥岩中饱含烃(主要是甲烷)的水在盐度差的作用下向砂岩透镜体中渗透,进入砂体后由于盐度增加,溶解(实质上是容纳作用)在水中的烃析出,与其他充注方式进入砂体的油气汇合在一起,进一步增加烃柱高度和含烃饱和度。

2.2 油气聚集和排水的动力

烃类的充注、聚集和砂体中孔隙水的排出几乎是同时发生的成藏事件。如果砂岩透镜体中的孔隙水不能排出,周围泥岩中的烃类就难以充注,更不可能在砂体中富集成藏。可见,砂体中油气的聚集与砂体中孔隙水的排出是一个问题的两个方面。

2.2.1 砂岩透镜体中油气的聚集

如前所述,无论烃类以何种充注方式进入砂体,其中大部分最终都会转变为游离相的油气。因此,在水介质中所产生的浮力就必然成为砂岩透镜体圈闭中油气聚集的主要动力。油气的浮力是重力的反映,其大小只取决于烃、水的密度差和烃柱的高度,不受体系内外压力大小的影响和限制。浮力与重力一样都是永恒而独立存在,所不同的是它们虽都作用在铅直方向,但浮力向上、重

力向下。在浮力的作用下油气将铅直地向砂体顶部运移和富集,同时油、气及其中组分也相应地按密度大小发生重力分异。

2.2.2 砂岩透镜体中孔隙水的排出

实际上,油气的上浮与孔隙水的排出是相辅相成同时发生的过程。因此,浮力既是砂体圈闭中聚集的动力,也是排替孔隙水的动力。这是因为在烃-水界面之上,任一点的烃柱浮力都会对相邻水体产生一种附加的压力^[11]。而此时无论体系中水体压力大小如何,由浮力产生的附加压力使得烃相的压力总是大于水体的压力。正是这种由烃柱浮力产生的超压,在有限的圈闭空间里将孔隙水排替出来。

四周为泥岩包围的砂岩透镜体,相对于外界虽是个封闭或半封闭的水力系统,但其内部则是相互连通的开放体系,其等水势面是相互平行的,其相对高、低只取决于上覆压力的大小。因此,早期充注进入砂体的含烃流体,其中的水包括被烃相排替出的孔隙水,最初主要是从砂体顶部的低势区排出;当油气在砂体顶部发生一定的聚集形成烃-水界面后,水就难以穿过油体(因无水相渗透率)从顶部排出,而这时只能从紧邻烃-水界面之下,水压(势)相对较低的边部排出^[7]。由于烃类不断充注、聚集、烃-水界面不断向下移动,排水位置也不断随之下移。如果烃源和动力足够充沛,这种排水作用可持续到砂体完全被烃类充满为止。世界上很多砂岩透镜体油气藏的充满度都很高,例如,我国东部目前最大的营 11 砂岩透镜体油藏,其充满度可达 94.1%^[12]。

2.3 砂岩透镜体成藏动力的演化过程

在一次沉降的生烃盆地中,砂岩透镜体的成藏动力几乎都与生烃有关,因此,随着生烃泥岩热演化的阶段不同,各种成藏动力的发育和重要性也有所侧重和不同。

2.3.1 生烃泥岩的低熟阶段

由于生烃泥岩埋深较浅,处于低熟的早期成岩阶段:此时生烃不多,主要是差异压实水流和渗

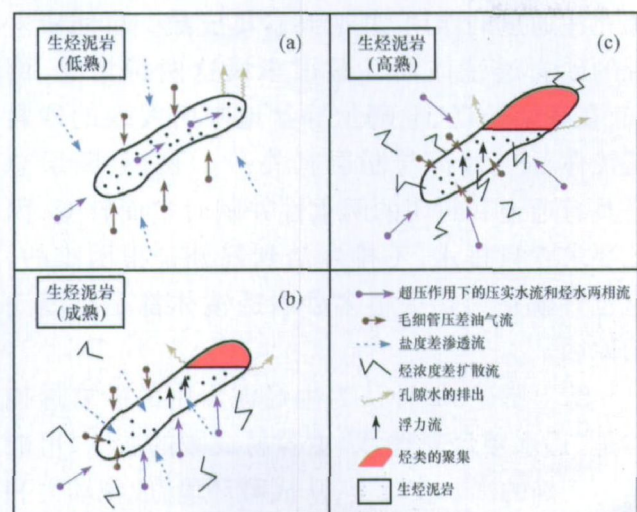


图 2 砂岩透镜体成藏动力学的概念模式
(据李明诚, 2004)

Fig. 2 Conceptual model for reservoiring
dynamics in sand lens

透水流的充注; 进入砂体以后除有极少量的溶烃析出和滞留外, 其中绝大部分的地层水都从砂体顶部排出 (图 2a)。

2.3.2 生烃泥岩的成熟阶段

随埋深的增加, 生烃泥岩进入成熟的晚期成岩阶段: 此时压实水流和渗透水流的充注明显减弱; 由于烃类大量生成, 因而主要发育以生烃超压为动力的烃-水两相渗流以及在砂、泥岩接触面上由毛细管压差产生的油气相充注, 同时由烃浓度差引起的分子扩散作用也得到加强; 进入砂体的烃类在浮力的作用下开始聚集成藏, 而排替出的孔隙水此时主要从紧邻烃-水界之下的边部逸出 (图 2b)。

2.3.3 生烃泥岩的高成熟阶段

由于持续埋深, 生烃泥岩进入大量生成凝析油和裂解气的高成熟晚期成岩阶段: 此时压实水流和渗透水流的充注已基本停滞, 主要发育生烃超压、毛细管压差和烃浓度差为动力的充注流体; 进入砂体的烃类在浮力作用下聚集高度和范围不断扩大, 烃-水界面和排水点也不断下移 (图 2c)。若烃源和动力足够充沛, 烃类的充注和聚集可直到砂体充满为止。但同时又有天然气从砂体顶部气聚集的部位不断扩散出来, 最终造成砂岩透镜体中以油相聚集为主。

3 影响砂岩透镜体成藏的地质因素

3.1 生烃泥岩的质量与厚度

3.1.1 生烃泥岩的质量

砂岩透镜体的烃源通常是直接来自四周的生烃泥岩, 而砂体成藏的动力也直接与生烃泥岩有关, 因此其质量的好坏就成为能否成藏的关键。一般说有机质丰度高, 类型好的烃源岩, 当其成熟时就可生成更多的烃类, 这一方面可增加泥岩中的含烃饱和度和烃相运移的有效渗透率。另一方面可产生更高的生烃超压和烃浓度, 从而提高充注动力和效率。此外, 有机质含量高的烃源岩所生成的烃类, 还可能沿不受毛细管阻力的干酪根网络运移, 可在较小的压差下直接充注砂岩体。现在看来, 残余有机碳 (有效碳) 含量在 1% 以上的生烃泥岩, 有利于其中砂岩透镜体的成藏。

3.1.2 生烃泥岩的厚度

砂岩透镜体四周的泥岩不仅是烃源岩也是封盖层, 因此无论是为了提供充足的烃源, 还是为了更好地保存聚集的烃类, 生烃泥岩本身都要有一定的厚度。特别是砂体顶部的泥岩不能太薄, 否则很难封闭其中的烃类 (尤其是天然气的扩散)。在砂、泥岩层系中, 泥岩生成的烃类主要是向上、下相邻的砂岩层排出, 因此只有位于生烃泥岩中部、在有效排烃厚度之外的砂岩透镜体, 才可能被充注更多的烃类。由此可知, 生烃泥岩不仅需要一定的厚度, 而且与砂体的厚度也相对要有一定的比例。根据排烃厚度的研究和推论, 笔者认为: 生烃泥岩的厚度至少应在 30 m 以上, 而砂、泥岩的厚度比至少在 1:3 左右, 即泥岩的厚度至少是砂岩厚度的 3 倍。显然, 那种“薄皮大馅”的砂岩透镜体, 不仅烃源往往不足, 充注的烃类也容易散失, 因而最终难以成藏。

3.2 砂岩透镜体的物性和产状

3.2.1 砂岩透镜体的物性

砂岩透镜体的孔、渗物性越好, 不仅可以为烃类聚集提供更大的空间, 还可以使烃类更容易充注、更容易富集形成高充满度的油气藏。相反, 若

砂体很致密与四周泥岩物性的差异越小,则不仅烃类难以充注,就是进入砂体的烃类也很难富集成商业性油气藏。若砂岩透镜体的孔、渗物性相对优于泥岩上、下相邻的砂岩层时,则将有利于烃类更多地向砂体充注。

3.2.2 砂岩透镜体的产状

砂岩透镜体除了体积大小直接决定着工业性的油气聚集外(在烃源充足情况下),其产状对成藏也有很大的影响。扁平状的透镜砂体(长轴方向平行于海平面)不如竖直状的透镜砂体有利于成藏,这是因为在相同体积情况下,前者顶、底的高差不如后者大,结果前者顶底间的压差小于后者,造成前者从砂体顶部排水的能力不如后者。另一方面当充注烃量相同时,在扁平状透镜砂体中形成的烃柱高度,小于在竖直状透镜砂体中的高度,结果由烃柱高度产生的浮力和对水的附加压力前者小于后者,造成从烃-水界面边部排水的能力前者低于后者,而孔隙水能否排出则是砂岩透镜体能否充注富集成藏的关键(图 3a 3b)。

通过大量的勘探实践发现砂岩透镜体成藏与断层关系密切,大体上可分为两种情况:一是生烃泥岩中的透镜体砂岩,当有断层穿过并与上、下砂岩层连通时,可以改变砂体的封闭状况成为开放的水力体系,从而有利于孔隙水的排出和成藏(图 3c);另一种是非生烃泥岩中的砂岩透镜体,当有断层穿过并连通上、下生烃泥岩时,则主要起烃

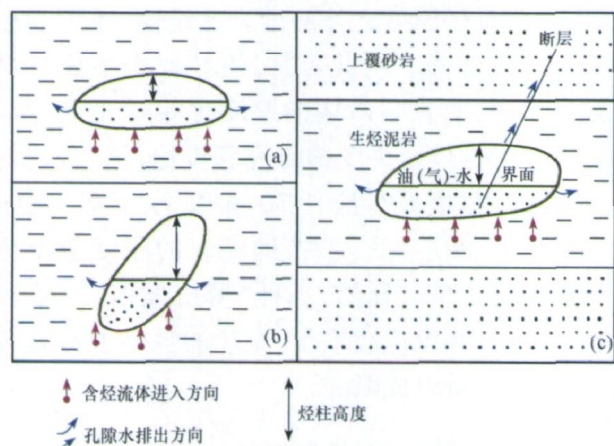


图 3 砂岩透镜体的产状对成藏作用的影响

(据李明诚 2004)

Fig. 3 Effects of sand lens occurrence upon reservoiring process

李明诚, 西北大学讲学多媒体, 2005

源充注通道的作用,并最终富集成藏。目前所发现的砂岩透镜体油气藏很多属这两种情况,例如,在我国松辽、准噶尔等盆地中所发现的砂岩透镜体油气藏都与断层有关^[13]。然而,断层总是具有通道和封闭的两重性并随时空而转变,因此要求它只排水、不排烃恰到好处是很困难的,这也许就是为什么很多砂岩透镜体都是空圈闭的原因。

综上所述,那种认为生烃泥岩中的砂岩透镜体是“近水楼台先得月”更容易成藏的看法,可能是不正确的^[7]。实际上,从成藏环境、成藏动力和影响成藏的各种地质因素等方面来看,砂岩透镜体成藏比构造圈闭成藏要困难得多。

4 结 论

1) 目前在我国油气年新增储量中,岩性、地层油气藏所占比例已将近 50%,但生烃泥岩中砂岩透镜体成藏的动力学机制,还是一个没有完全解决的问题,因此进一步探讨其成藏动力学问题,具有重大的理论和实际意义。

2) 砂岩透镜体圈闭在水动力系统、油气充注、孔隙水的排出等成藏特征方面与背斜构造圈闭有很多不同。

3) 砂岩透镜体成藏的充注动力主要是异常高压、毛细管压差、分子扩散和渗透压力,而砂体中油气的聚集和排出孔隙水的动力主要是浮力及其对水体的附加压力。

4) 随生烃泥岩的热演化阶段不同,砂岩透镜体的各种成藏动力在低熟、成熟和高熟各个阶段也都有所侧重和不同。

5) 影响砂岩透镜体成藏的地质要素是生烃泥岩的质量与厚度以及砂体的物性和产状,其中断层与砂体成藏关系密切。

综上所述,砂岩透镜体成藏要比构造圈闭成藏困难得多。

参 考 文 献

- 1 刘震, 赵政璋, 赵阳, 等. 含油气盆地岩性油气藏形成和分布特征 [J]. 石油学报, 2006, 27(1): 21~22
- 2 Levorsen A I The obscure and subtle trap [J]. AAPG Bull

- 1966 50(10): 2 058– 2 067.
- 3 Cordell R J How oil migrates in elastic sediments[J], World oil (Part 3), 1977, 184(1): 97– 100
- 4 Berg R R. Capillary pressures in stratigraphic traps[J]. AAPG Bull 1975, 59(5): 939– 956
- 5 陈冬霞, 庞雄奇, 邱楠生, 等. 砂岩透镜体成藏机理 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004 29(4): 483~ 488
- 6 邹才能, 贾承造, 赵文智, 等. 松辽盆地南部岩性- 地层油气藏成藏动力和分布规律 [J]. 石油勘探与开发, 2005 32(4): 29(4): 379~ 383
- 11 Chapman R E. Effects of oil and gas accumulation on water movement[J]. AAPG Bull 1982, 66(3): 368– 372
- 12 万晓龙, 邱楠生, 张善文, 等. 东营凹陷砂岩透镜体油气藏成藏特征探讨 [J]. 中国海上油气, 2004 16(2): 89~ 92
- 13 林景晔, 门广田, 黄微. 砂岩透镜体岩性油气藏成藏机理与成藏模式探讨 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004 23(2): 5~ 7
- 14 王克, 查明. 考虑烃源岩非均质性的排烃模型 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(4): 440~ 443, 449
- 9 李大伟. 新构造运动与渤海湾盆地上第三系油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(2): 170~ 175
- 10 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系 [J]. 石油与天然气地质, 2000 21(2): 201~ 206
- 11 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析 [J]. 石油实验地质, 2003 25(1): 69~ 75
- 12 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及其影响因素 [J]. 地质科学, 2004 39(2): 159~ 167
- 13 侯平, 周波, 罗晓容. 石油二次运移路径的模式分析 [J]. 中国科学, 2004 34(S1): 162~ 168
- 14 赵贤正, 郑良合, 李廷辉, 等. 渤海湾滩海地区构造和沉积特征及有利勘探区带 [J]. 石油地球物理勘探, 2004 39(3): 348~ 353
- 15 袁淑琴, 丁新林, 苏俊青, 等. 大港油田滩海区埕北断阶带油气成藏条件研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2004 26(S0): 8~ 9
- 16 李廷辉, 梁惠兰, 胡永军, 等. 渤海湾埕北断阶区油气二次运移模式及其对勘探的作用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2004 19(1): 19~ 23
- 17 刘伟兴, 谭守强, 袁淑琴. 歧口凹陷中浅层油气富集因素及成藏模式 [J]. 中国海上油气 (地质), 2002 16(3): 40~ 45
- 18 王光奇, 漆家福, 岳云福. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化歧口凹陷中浅层油气富集因素及成藏模式 [J]. 地质科学, 2003 38(2): 230~ 240
- 19 樊敬亮, 黄志全, 樊卫花. 歧口凹陷新生代构造演化与油气 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2004 34(4): 536~ 541
- 20 吴元燕, 付建林, 周建生, 等. 歧口凹陷含油气系统及其评价 [J]. 石油学报, 2000 21(6): 18~ 12
- 21 贾爱林, 肖敬修. 油藏评价阶段建立地质模型的技术与方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 1~ 232
- 22 张立宽, 罗晓容, 廖前进, 等. 埕北断阶带断层封闭性研究及其应用 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(2): 181~ 190
- 23 Lerche I Thomsen R O. Hydrodynamics of oil and gas[M]. H ingham: Plenum Press 1994 1– 308
- 24 Dahlberg E C. Applied hydrodynamics in petroleum exploration [M]. New York Springer-Verlag 1982 1– 171
- 25 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Heidelberg Springer-Verlag 1984 1– 699

(编辑 高 岩)