

文章编号:1001-6112(2000)03-0195-06

毛细管力是油(气)初次运移的动力吗?

王志欣

(石油大学,北京 100083)

摘要:一般认为,在油气的二次运移过程中,由于孔隙结构的变化,当连续油(气)相后端曲率半径大于前端时毛细管力是油气运移的阻力,而当连续油(气)相后端曲率半径小于前端时毛细管力是油气运移的动力;毛细管力总是趋向于使非润湿相占据较大的孔隙空间。在浮力、水动力和毛细管力的共同作用下,油(气)呈间歇性运动,这在物理模拟实验中已得到证实。实际上,在毛细管中存在着 3 种毛细管力。第一、二种方向与毛细管延伸方向平行,第三种垂直于毛细管管壁并指向非润湿相;第三种毛细管力主要起增大非润湿相与孔喉壁之间的摩擦阻力的作用,在孔喉较粗的介质(如储集层)中该类毛细管力常常被忽略。油气要发生运移,则沿前进方向上的动力必须超过该方向上的毛细管阻力和摩擦阻力。现在有一种观点,认为在油气从烃源岩向储层的初次运移过程中,毛细管力是重要的动力,因而在水润湿的条件下,油、气相会在毛细管力作用下自动地由小孔隙和细喉道向较大、较粗的孔隙和喉道内运动。本文从毛细管现象的本质入手对这一问题进行了分析,发现烃源岩和运载层中不同种类的毛细管力的作用有很大区别:在运载层中,因为孔隙喉道较粗,第一、二类毛细管力起主要作用,第三类毛细管力的作用常常被忽略;而在烃源岩中,由于毛细管半径全面缩小,第三类毛细管力与第一、二类相比急剧增大,导致摩擦阻力剧增,从而成为烃源岩排烃的主要阻力。“毛细管力是排烃动力”这一观点是忽视烃源岩中起决定作用的第三种毛细管力而得出的错误认识。通过对泥页岩孔隙结构的研究,作者提出了泥页岩中的孔隙主要是“死孔隙”的观点,而烃源岩的排烃则主要是通过微裂隙的突发涌流,微裂隙的开启或产生及涌流的发生则都与激烈的突发构造运动有关。

关键词:毛细管力;摩擦阻力;孔隙结构;运载层;烃源岩;初次运移

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

1 问题的提出

在均匀多孔介质中,在存在不混溶的两相流体的情况下,毛细管力对非润湿相的流动起阻碍作用。只有非润湿相所受的动力大于前进方向上的毛细管阻力时,该相才能流动。这是多相渗流的本质,许多论著^[1,2]都对这一问题进行过阐述。

多孔介质中存在 3 种毛细管力:第一种是毛细管半径变化造成的,方向与毛细管本身的延伸方向平行;第二种是非润湿相运动所产生的润湿滞后造成的,方向也与毛细管本身的延伸方向平行;第三种方向垂直于毛细管管壁指向非润湿相。由于非润湿相运动时前进方向上的曲率半径总是小于后端的曲率半径,第二种毛细管力总是阻碍非润湿相的运动,但当运移速率极其缓慢时可以忽略。第三种毛细管力总是起到增大非润湿相运动的摩擦力的作用,而

且毛细管越细,该毛细管力也越大。因而造成的阻力也越大。也就是说,第三种毛细管力对非润湿相的运移也总是起阻碍作用。对于在物性较好的运载层中的油气运移,通常都没有考虑第三种毛细管力的影响。第一种毛细管力对非润湿相的作用决定于非润湿相两端的毛细管半径的大小。从微观上来看,非润湿相两端的毛细管如果半径不同,则其合力指向半径较粗的一端,即该毛细管力的合力总是趋向于推动非润湿相由较细的毛细管移向较粗的毛细管。

据此,有的学者^[3]提出,在水润湿的条件下,烃源岩层中的油气(非润湿相)会自动地向储层中运移,即毛细管力是油气初次运移的动力。这一观点听起来似乎有理,因为(第一种)毛细管力的合力总是趋向于将非润湿相推向半径较粗的孔隙喉道;但也有令人不解的疑点:烃源岩孔喉半径总是小于运载层的孔喉半径。如果烃类一直都存在着从烃源

收稿日期:2000-02-14;修订日期:2000-05-08.

作者简介:王志欣(1963-),男(汉族),山东胶南人,博士、高级工程师,主要从事石油地质与勘探的研究工作。

岩向运载层的自发运移过程或倾向,为什么大部分生成的烃类会残留在源岩中?又是什么力阻碍了油气的排出? 烃源岩常常是渗透性极低的,那么油气排出后留下的空间由什么物质来填补?要解答这些疑问,必须对毛细管的本质和烃源岩及运载层中的毛细管现象进行分析。

2 运载层中的毛细管现象

2.1 简单毛细管模型

进入运载层之后,分散的油滴分布于较大的孔隙和喉道之中。油滴在毛细管力的作用下很快会达到平衡状态。假如存在如图 1a 所示的状态,而且没有浮力和水动力的作用,则油滴所受到的力未达到平衡,这时 $P_{C1} > P_{C2}$,油滴会在毛细管压差的作用下向左侧移动,最后稳定在图 1b 所示的状态。

2.2 曲颈式毛细管模型

运载层中的油(气)的运移路径是由粗细不均的

孔隙和喉道组成的。油相在孔喉体系中所受的毛细管压差的大小和方向取决于连续油相前后端油水界面的曲率,即毛细管压差总是由连续油相曲率半径小的一端指向曲率半径较大的一端(见图 2)。因为标号 1、2、...、5 的各个曲颈两侧所产生的两相界面的变形是相同的,所以在这些喉道两侧产生的毛细管压差为零。连续油相两端的毛细管压差 $P_c = P_{C2} - P_{C1}$, P_c 的大小和方向均与标号为 1 到 5 的中间段的孔喉形状无关。

当不考虑油相所受的浮力和水动力的作用(即毛细管平置,且为静水系统)时,毛细管压差的作用是调整连续油相两端油水界面的曲率达到平衡,即连续油相两端的毛细管压差趋于变为零,最后油相达到静止状态。将 1 - 5 号喉道忽略不计,则图 2 所示的模型与图 1 所示的模型等价。

运载层的孔隙网络是三维的,因此油滴的尖端向左侧大孔隙移动后留下的空隙就被通过孔隙网络相连通的水补充过来。

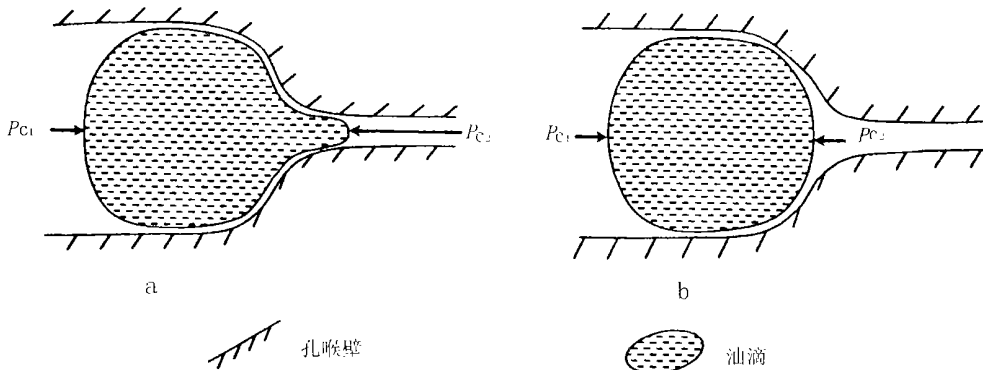


图 1 简单毛细管模型中非润湿相受到的毛细管压差

a. $P_{C1} < P_{C2}$,不平衡;b. $P_{C1} = P_{C2}$,平衡

Fig. 1 Capillary pressure differences exerted on nonwetting phases in a simple capillary model

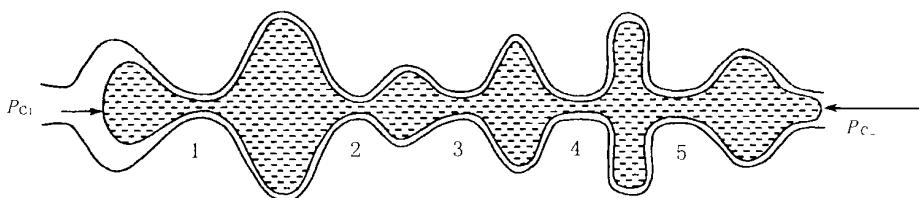


图 2 曲颈毛细管模型中的毛细管压差

Fig. 2 Capillary pressure differences in a goose-neck capillary model

2.3 毛细管力对油相二次运移的作用

运载层中孔隙结构的变化导致油相前后端曲率半径的交替变化,毛细管压差的方向和大小也不断地变化。如图 3a 所示,油相在动力(浮力或水动力)作用下向左侧运移,当连续相前端处在较粗大孔道中、而后端处在较细的喉道中时,则后端的毛细管力大于前端,且合力与运移方向一致;此时毛细管压差有助于油相向左侧运动。如图 3b 所示,连续油相向左运动受到了前方毛细管的阻挡,毛细管力增大,而油相后端已移到较粗孔道中央,毛细管力减小;因此,当前端的曲率大于后端的曲率时,毛细管压差的方向与运移方向相反,是运移的阻力。

对于图 3 所示的毛细管系统,连续油相向左侧运移可能遇到的最大的毛细管阻力为:

$$P_c = \cos \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

而对油相向左侧运移可能产生的最大的推动力为:

$$P_c = \cos \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} \right).$$

由于运载层形成于不同的沉积、成岩环境中,孔隙结构也很不相同。一般可以分为 3 种情况:

均质运载层,即在较大的范围内 $R_1 = R_2, r_1 = r_2$;

沿运移方向孔隙喉道变粗,即 $R_1 > R_2, r_1 > r_2$;

沿运移方向孔隙喉道变细,即 $R_1 < R_2, r_1 < r_2$ 。

对于第 1 种情形,毛细管压差对连续油相推动和阻挡的力是相同的,即, $P_c = P_c$ 。但要使油相连续地向前运移,则油相所受的动力(包括浮力和水

动力)必须超过 $\cos \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ (其中 $r_1 = r_2, R_1 = R_2$)。所以从宏观上来说,油相要连续地运移必须要达到某个临界条件。严格地讲,毛细管力既不是动力,也不是阻力,而是一种起缓冲作用的力。

对于第 2 种情形,沿油相运移方向上毛细管阻力逐渐变小,推动油相向前运动的毛细管压差也逐渐变小,但总的趋势是在前端受到的毛细管阻力略小于后端的推动力。毛细管力对油相运移的推动作用为间歇性的,阻挡作用也是间歇性的,而且两者不一定同时起作用。随着油相从物性较差的地带向物性较好地带的移动,油相克服毛细管阻力继续运移所需要的临界动力也减小了,油相的运移相对容易和畅通了,但阻碍油气向前运移的毛细管压差还在间歇性地起着作用。

对于第 3 种情形,沿油相运移方向上毛细管阻力逐渐增大,推动油相向前运动的毛细管压差也在逐渐增大,但总的趋势是前端所受的毛细管阻力略大于后端的推动力。而且由于前进的毛细管阻力增大,油相克服毛细管阻力继续向前运移所需要的临界动力增大了,因此连续油相的长度必须增大才能向前运移。所以总地表现为油相向前运移越来越难了。

三角洲砂体等向上变粗沉积的运载层可以视为第 2 种情形。油相在从砂体底部向上运移的过程中受到的毛细管力的间歇推动略大于间歇性的毛细管阻挡作用,越向上油相越容易运移。河道砂体、浊积砂体等具向上变细层序的运载层中油相由下而上运移可以视为第 3 种情形。油相向上运移的毛细管阻力逐渐增大,运移越来越困难。

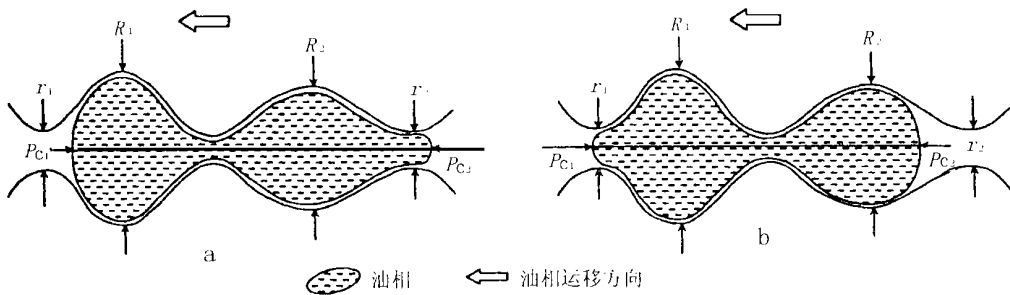


图 3 油相运移过程中毛细管压差的变化

a. 压差指向与运移方向相同;b. 压差指向与运移方向相反

Fig. 3 Changes of capillary pressure differences in the migration of the oil phase

地质条件下不存在物性绝对均一的运载层,也不存在物性变化完全向同一方向单调变好或单调变坏的情形。油相二次运移途中一会儿受毛细管压差的阻挡,一会儿又受其推动。而且随着运载层的孔隙结构在空间上的变化,推动力和阻力有消有长。有时推动作用略强,油相的运移变得畅顺;而有时则阻挡作用略强,油相的运移变得困难。

3 烃源岩中的毛细管现象

烃源岩具有比运载层更细的孔隙和喉道,因此其毛细管力更高。这里仍然沿用一些简化的模型来分析烃源岩中毛细管力的作用。

3.1 基于压实变化的模型

通常认为在压实过程中泥质岩的孔隙将逐渐缩小,但泥质岩顶底面靠近砂砾岩等较好的渗透层的部分压实作用明显,而向泥质岩层内部压实作用逐渐减弱;也就是说,泥岩层内的孔隙和喉道由层面附近到层中央逐渐增大。在这种情况下,考虑到图 1 和图 2 所表示的等价模型,泥质岩从顶面到底面孔喉大小的变化可以简化为如图 4 所示的模型。

在图 4 所示的泥质岩层内,如果泥质烃源岩是水润湿的,则游离相态的烃类在毛细管力的作用下趋于向层内运移,这与排烃方向是相反的。还应注

意到,在烃源岩中,由于孔隙和喉道非常细小,孔喉半径的差异和孔隙迂曲度较高,毛细管阻力很大;加上由于毛细管半径减小,非润湿相对毛细管壁的压力(第三种毛细管力)增大,其与管壁之间的最大静摩擦力很大,油气要发生运移是十分困难的。

如果泥质烃源岩在发生了一段时间的排烃过程后,其排烃的孔隙和喉道的润湿性发生了转化,则油相有从岩层中央的欠压实带向层面附近的压实带运移的自发趋势,但层中央必须有新的流体补充才能发生运移;而油层(储层)内的油也存在向泥岩的压实致密带回灌的趋势。其实这两种趋势都是不存在的。因为事实证明任何烃源岩层中都是距层面较远的欠压实带内排烃效率较低,而且残留烃较多;而在靠近层面的正常压实带内排烃效率高,而且残余烃少。另外,也未发现储层内的烃类向油润湿的生油层回灌的实例。

3.2 基于泥岩孔隙结构新认识的模型

前面在讨论泥质岩的孔隙和喉道时,有一个重要的假设,即泥质岩中的孔隙和喉道是连通的网络。该假设的根据是:首先,泥质岩在压实过程中排出其中的孔隙水以及泥质烃源岩排出其中生成的油气是通过孔隙网络进行的,这已经基本上成为共识;其次,泥岩样品在实验室条件下都测得了一定数值的渗透率。这一关于泥质岩中连通孔隙网络的假设把研究者的视线都紧紧地吸引到了“毛细管作用”这一方面。

根据 David Deming 等^[4]的研究,如果以实验室实测的泥质岩渗透率计算厚层泥页岩对异常地层压力的封闭能力,则发现即使是渗透率很低的泥页岩对异常超压的封闭时间相对于地质历史来讲也是十分短暂的。这一结果与中、新生代沉积盆地(甚至于个别古生代沉积盆地)中普遍存在异常高压的现实是矛盾的。这一矛盾可以有两种解释:要么是泥页岩层内有源源不断的流体生成以保持超压的持续存在;要么是实验室内测量的泥页岩的渗透率值大大地夸大了泥页岩层的实际渗透能力。

根据对泥页岩成岩演化史的研究^[5]可知,泥质岩中形成超压的因素有以下几点:欠压实;粘土矿物成岩转化脱水;沉积有机质生烃。这几种因素都是局限于一定的温度、压力条件下起作用的,而且更为重要的是泥岩中矿物转化脱出的水和有机质生烃产生的流体数量都是有限的,这两个过程都不可能无休止地为异常高压体系提供流体。所以可以

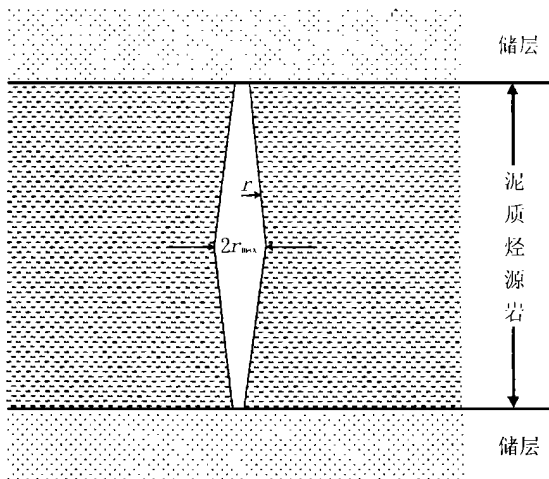


图 4 泥质烃源岩中孔隙喉道半径 r 与压实强度关系示意图

由岩层中央向顶底面方向压实强度增大,孔隙半径减小

Fig. 4 Sketch map showing the relationship between the throat radius (r) and compaction intensity in argillaceous source rocks

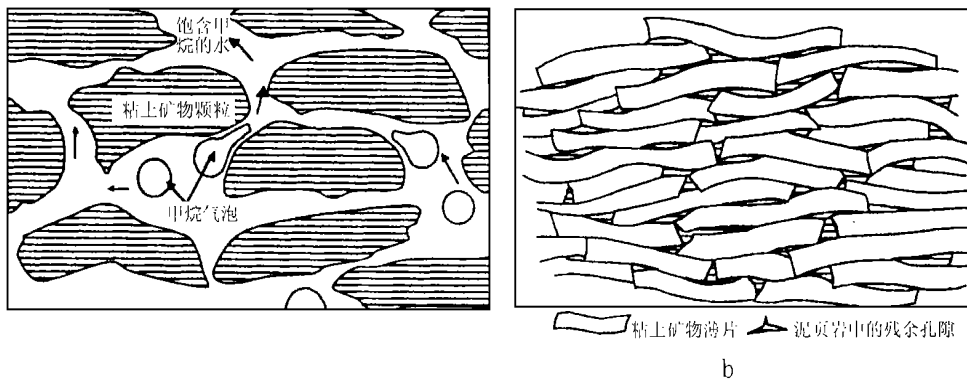


图5 泥岩连通孔隙网络模型和死孔隙模型的对比
a. 泥页岩连通孔隙模型(据 Hedberg,1978);
b. 泥页岩死孔隙模型

Fig.5 Correlation of the net-like pore model to the dead-end pore model for argillite

肯定地说,持续不断地提供流体的流体源是不存在的。

既然不存在持续的流体源,则必然是实验室测量的泥页岩渗透率大大地高于泥页岩层的实际渗透率。根据这一推测,我们可以断定,泥页岩的渗透性是与被测岩样的大小相关的,被大家普遍接受的关于“泥页岩中的孔隙网络是连通的”这一观点必须进行修正。

据此,我们提出了“泥页岩中的孔隙是彼此孤立的”的观点,认为泥页岩随着成岩压实作用的进行,其中的片状粘土矿物趋于平行于岩层面定向排列。片状矿物的翻覆叠加及其本身的塑性变形,造成了岩层内特别是垂直岩层面方向上延伸的孔隙被大量地堵塞。由于泥页岩层厚度很大,所以没有哪一个孔隙能够侥幸从岩层的底面贯穿到顶面而不被堵塞。随着岩层厚度的增大,泥页岩的基质渗透率实际上趋于零。因此,实验室中测量的泥岩样品的渗透率不能代表整个泥岩层的渗透性能。

根据以上对泥页岩孔隙结构的新认识可以认为,泥页岩中的孔隙都是死孔隙。若要在死孔隙中的非润湿相流体从岩层中排出,靠毛细管力是绝对达不到的。因为毛细管力只能在这些孤立的孔隙内部起调节作用。油气要从烃源岩中排出,必须通过张开的微裂缝^[6]。

微裂缝比孤立孔隙延伸长度大且比较平直。层内的流体通过微裂缝导出到层外。在厚层泥页岩中,微裂缝的遭遇与微孔隙相似,也会因为粘土矿物

的塑性变形而闭合或被堵塞。只有那些靠近泥页岩层面发育的微裂缝可以起到排油的作用。因此,靠近层面的部分排烃效率较高,而远离层面的泥岩层的中央部分因微裂缝难以达到而排烃效率较低。

根据王平^[7]的观点,地下岩层中的微裂缝在通常情况下也应该是封闭的,开启过程是很短暂的。在实验室中测量渗透率时,由于岩心夹持器内的围压条件远低于实际的地质条件,所以所测的渗透率很可能是在实验条件下张开的微裂隙的渗透率。因此,烃源岩的排烃如果是微裂缝为通道的话,也必然是幕式的过程。短暂开启的微裂缝既为排烃提供了直达运载层的通道,又大大降低了排烃过程的毛细管阻力。幕式涌流的机理对封存箱破裂和流体越层运移的解释已得到广泛的认可,相信幕式排烃也是烃源岩排烃的主要方式,而排烃的根本动力是烃源岩层内的异常高压以及因为突发构造运动造成的压力突然上升。

4 结论

根据上述分析,我们可以得出以下结论:

(1)即使泥岩是网络状的连通孔隙介质,因为其孔喉极细,毛细管力及毛细管力引起的摩擦力也都是排烃的阻力。

(2)在烃源岩中,微孔隙绝大多数是孤立的死孔隙,这时谈不上毛细管力的问题。

(3)当烃源岩内因突发的外部作用而引发异常

高孔隙压力时,可能导致泥质岩中隐蔽微裂缝张开或产生新的微裂缝,使孔隙水和油气一起快速涌出。烃源岩的排烃过程主要是通过微裂缝的幕式涌流。

参考文献:

- [1] 杜林 F A L. 多孔介质——流体渗移与孔隙结构[M]. 北京:石油工业出版社,1988.
- [2] 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,1982.
- [3] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [4] Deming D. Factors necessary to define a pressure seal[J]. APPG Bull, 1994, 78(6).
- [5] 真炳钦次. 压实与流体运移[M]. 北京:石油工业出版社,1985.
- [6] 陈章明. 泥质生油岩成岩微裂缝的形成及其排烃意义[J]. 大庆石油学院学报,1990,(2).
- [7] 王平. 含油盆地构造力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,1993.

IS CAPILLARY POWER A DRIVING FORCE FOR THE PRIMARY MIGRATION OF OIL AND GAS ?

WANG Zhi-xin

(University of Petroleum, Beijing 100083, China)

Abstract : Generally speaking, during the secondary migration of hydrocarbon, capillary power is the resistance of hydrocarbon migration when the rear-end curvature radius of the continuous oil (gas) phase is greater than the front-end's and is the driving force when the rear-end curvature radius is smaller than the front-end's because of the change of pore structure. Capillary power always tends to making the nonwetting phase occupy larger pore space. Under the joint action of buoyancy, hydrodynamic force and capillary power, oil (gas) moves intermittently. This has been verified in the physical simulation experiment.

In fact, there are three types of capillary power. The first and the second types are parallel to the extensional direction of capillary, and the third is perpendicular to the wall of capillary and directs to the nonwetting phase. The third type of capillary power takes effect to increase the frictional resistance between the nonwetting phase and the throat wall, and is usually neglected in the media with wider throats (such as reservoirs). Hydrocarbon can migrate only when the driving force in the advancing direction surpasses the sum of the capillary resistance and the frictional resistance in this direction.

A prevailing viewpoint says that capillary power is an important driving force during the primary migration of hydrocarbon from source rocks to reservoirs. So under the water-wetting condition, the oil (gas) phase will move spontaneously from small pores and thin throats to larger pores and wider throats. In this paper, the author studied this problem starting with the essence of capillary appearance and found that different types of capillary power act quite differently in source rocks comparing with in carrier beds. Because of the wider throats, the first and the second types of capillary power take main parts and the role of the third type of capillary power is often neglected in carrier beds. And in source rocks, the third type of capillary power increases greatly compared with the first and the second types because the capillary radius reduces all-roundly. This results in the steep rise of frictional resistance and makes it be the main resistance of hydrocarbon expulsion from source rocks. Therefore the viewpoint that "capillary power is a driving force for hydrocarbon expulsion" is a wrong conclusion due to unreasonable neglecting the third type of capillary power which plays a decisive role in source rocks. By studying the pore structure of argillutite, the author suggested that the pores in argillutite should be mainly "dead pores", and the hydrocarbon expulsion of source rocks should be eruptive surging through microfractures whose opening or forming and the happen of surging all have something to do with sudden and fierce tectonic movement.

Key words : capillary power; frictional resistance; pore structure; carrier beds; source rocks; primary migration