鄂尔多斯盆地长$_9$油层组石油运聚规律研究

段毅[1)]，于文修[1)]，刘显阳[2)]，郭正权[2)]，吴保祥[1)]，孙涛[1)]，王传远[1)]

1）中国科学院地质与地球物理研究所气体地球化学重点实验室，兰州，730000；

2）中石油长庆油田勘探开发研究院，西安，710021

内容提要：鄂尔多斯盆地长$_9$油层组是一个新发现的含油层。迄今为止，有关长$_9$油层组石油运聚成藏机理尚不清楚，特别是对石油运聚规律缺乏认识。该问题的解决会进一步完善鄂尔多斯盆地中生界延长组石油成藏理论；同时，对长$_9$油层组石油勘探开发具有重要的指导作用。我们对长$_9$油层组石油来源、油气输导体系、油气运移路径和油气运移动力等油气运聚条件特征及其不同地区差异进行了研究，结果表明，长$_9$油层组原油主要来自长$_7$烃源岩，只有在志丹局部地区来自长$_7$和长$_9$烃源岩；长$_9$油层组石油的纵向运移路径是由上向下运移；孔隙型输导体和断层、构造裂隙输导体是长$_9$油层组石油运移的主要输导体；盆地长$_7$油层组普遍存在高过剩压力带，长$_7$与长$_9$油层组之间存在较大的流体压力差，因此长$_7$油层组生成的油气在高过剩压力驱动下可以向下运移，进入储层物性相对好的长$_9$砂体聚集成藏。同时，建立了3种长$_9$油层组油气运聚模式，讨论了长$_9$油层组油气运聚机理。

关键词：鄂尔多斯盆地；长$_9$油层组；运聚条件；运聚机理

近年来，随着世界科学技术和石油工业的迅速发展，国内外对石油成藏机理和分布规律的研究有了长足的发展。总的研究发展趋势表现为，从单一成藏要素和地质作用的研究向各种成藏要素和地质作用有机匹配综合研究方向发展。特别是油藏地球化学、储层地球化学和模拟实验等先进方法的引入，使油气成藏期次和过程等方面的研究取得了新的发展（赵孟军等，2004；王飞宇等，2002）。

鄂尔多斯盆地是我国第二大含油气沉积盆地，盆地内部构造简单（图1）、地层平缓（倾角不足1°），中生代地层蕴藏着丰富的石油资源。20世纪60～70年代，鄂尔多斯盆地侏罗系一直是油气勘探的主要目标层系；80年代早期，勘探的重点转向了上三叠统延长组长$_6$以上的油层组，发现了安塞和晋安大型油田；尤其是近十余年来对陇东地区延长组的油气勘探取得突破性进展，并且于2001年发现了以长$_8$油层组为主要目的层的大型油气田——西峰油田。然而，长$_9$油层组钻探程度非常低；近几年，在伊陕斜坡、天环坳陷和渭北隆起构造带勘探均获得工业油流，说明长$_9$油层组具有很好的勘探开发前景，有望成为长庆油田增储上产的接替层系。但是，时至今日，有关长$_9$油层组石油运聚成藏机理尚不清楚，特别是对石油运聚规律缺乏认识。该问题的解决会进一步完善鄂尔多斯盆

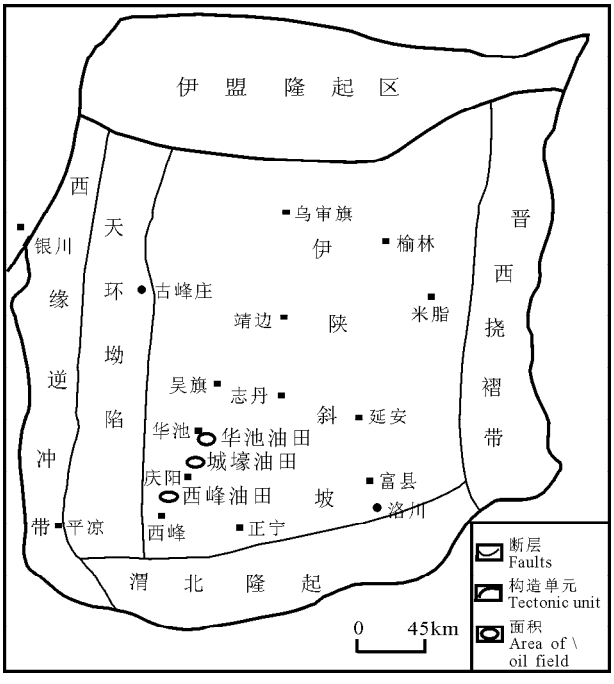

图1 鄂尔多斯盆地构造分区

Fig. 1 Outline map of the Ordos Basin

注：本文为国家“973”项目（编号2005CB422105）、国家自然科学基金项目（编号40772069和40872092）和国家油气专项资助成果。

收稿日期：2008-04-10；改回日期：2008-07-14；责任编辑：周健。

作者简介：段毅，男，1956年生。博士，现为中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心研究员、博士生导师，主要从事油气地球化学、石油地质和有机地球化学研究及教学工作。通讯地址：730000，兰州市东岗西路382号；电话：0931－4960889。

地中生界延长组石油成藏理论;同时,对长$_9$油层组石油勘探具有重要的指导作用。

1 长$_9$油层组原油的来源

延长组长$_7$—长$_9$油层组均存在烃源岩,它们都形成于湖相环境(付金华等,2004;段毅等,2006,2007),因此不同层位烃源岩中生物标志化合物总体特征相似,这给不同层位油源对比带来了一定困难。另一方面,由于沉积相的变化,延长组同一层位烃源岩中大部分生物标志化合物组成,在不同地区存在着差别(表1),必须分区进行油源对比。为了进行油源对比,我们对鄂尔多斯盆地不同地区延长组长$_9$原油和长$_7$—长$_9$潜在烃源岩进行了生物标志化合物分析(表1),并且选择了能够代表环境和母源性质的灵敏指标,即Pr/Ph值和C_{29}甾烷含量作为油源对比指标。通过对鄂尔多斯盆地延长组长$_9$油层组的原油进行分区油源对比发现(表1):①古峰庄—元城地区长$_9$油层组的原油来自其南部(午61井)的长$_7$烃源岩;②白豹、长武、正宁地区长$_9$油层组的原油来自与其临近的西峰、镇原、正宁地区长$_7$烃源岩;③志丹地区长$_9$油层组的原油主要来自志丹及其临近地区长$_9$和长$_7$烃源岩;④洛川地区长$_9$油层组的原油主要来自正宁—洛川地区长$_7$烃源岩。这说明,鄂尔多斯盆地长$_9$油层组的原油主要来自长$_7$烃源岩,只有在志丹地区长$_9$油层组的原油除了来自长$_7$烃源岩,部分还可以来自长$_9$烃源岩。这种结果与鄂尔多斯盆地延长组烃源岩分布是一致的。延长组长$_7$—长$_8$烃源岩为半深湖—深湖沉积的泥岩、碳质泥岩及油页岩(付金华等,2004),烃源岩有机碳含量较高,特别是长$_7$油层组中有机碳在本区最高;烃源岩母质类型以混合型为主,并且长$_7$油层组最好,长$_8$次之;烃源岩有机质均成熟(Wang et al., 1995;段毅等,2005)。根据长庆油田研究,长$_9$暗色泥岩烃源岩在盆地东部志丹地区最厚,其有机碳含量平均高达5.03%;有机质类型为腐泥-腐殖型;镜质组反射率分布在0.68%～1.19%之间,达到成熟—高成熟阶段。因此,最好的长$_7$油层组烃源岩可以为长$_9$油层组油藏提供油源,盆地东部地区,特别是志丹地区最好的长$_9$烃源岩也可以为该地区长$_9$油层组油藏提供油源。

表1 原油和烃源岩中生物标志化合物分布特征

Table 1 Distributions of biomarker compounds in crude oils and source rocks from Ordos Basin

样品性质	地区	井位	层位	Pr/Ph	C_{29}甾烷含量(%)	油源
原油	古峰庄—元城	峰2、峰12、元108、元152、元159井	长$_9$	1.48～1.65	40～42	与其南部午61井长$_7$烃源岩具有可对比性
	白豹、长武、正宁地区	白165、长20、正6、正10井	长$_9$	0.95～1.47	44～49	与其临近的西峰、镇原、正宁地区长$_7$源岩具有可对比性
	志丹地区	丹49井	长$_{8-9}$	1.90	43	主要与志丹及其相邻地区长$_9$和长$_7$烃源岩具有可对比性
		丹48井	长$_9$	1.45	NA	
	洛川地区	旺9井	长$_9$	1.28	NA	主要与正宁地区长$_7$烃源岩具有可对比性
烃源岩	元城地区	午61井	长$_7$	1.44～1.79	39～40	
	元城及其南部地区	午61、元153井	长$_8$	1.59～1.87	38～46	
		元153井	长$_7$	2.52	52	
		元153井	长$_9$	3.21	48	
	西峰、镇原、正宁地区	镇69、井宁4、镇33井	长$_7$	1.03～1.47	46～50	
		镇59井	长$_8$	3.44	55	
	志丹—洛川地区	丹48井	长$_9$	1.49～1.56	45	
		旺9井	长$_7$	1.43	54	

2 油气运移

通过上述油源对比可知,鄂尔多斯盆地长$_9$油层组的原油主要来自长$_7$烃源岩,原油中含氮化合物的分布特征,同样指示了长$_9$油层组的原油由上部油层组运移而来。为了从油气运移方面了解所研究原油的纵向运移方向和确定原油是来自长$_9$油层组上部烃源岩,我们分析了古峰庄地区、庆阳地区和富县地区长$_7$、长$_8$、长$_9$和长$_{10}$油层组原油中咔唑类化合物异构体组成。如图2所示,从长$_7$、长$_8$、长$_9$油层组至长$_{10}$油层组,原油中咔唑类化合物异构体比值增加,原油中咔唑类化合物富集屏蔽化程度高的异构体。同一油源的原油中含氮化合物组成这种变化,无疑与运移分馏作用有关(Hwang et al., 2002; 李素梅

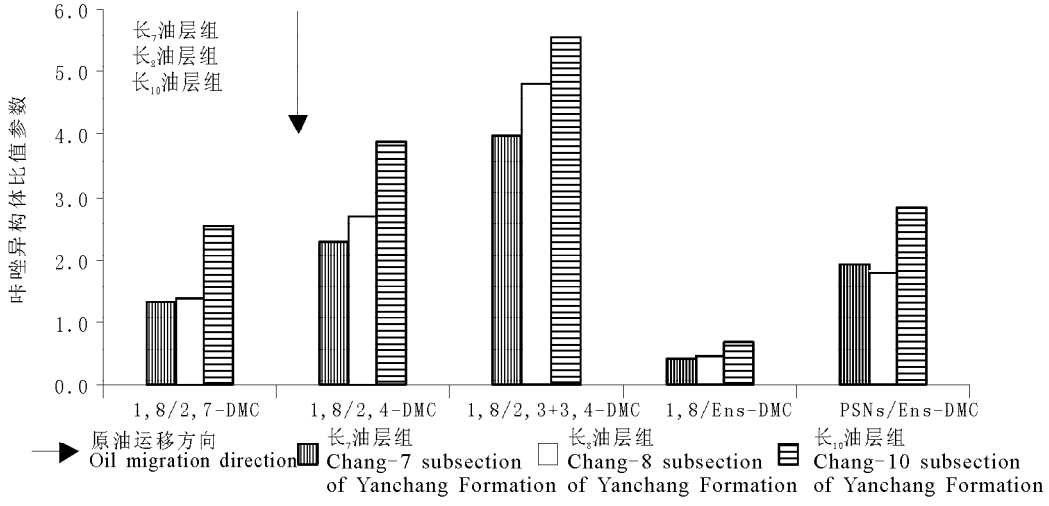

图 2　富县地区不同层位原油中咔唑类化合物异构体比值分布

Fig. 2　Distribution of isomer ratio values of carbazoles in crude oils from different subsection of the Yanchang Formation for Fuxian region

等,2002;Duan et al., 2006)。这就说明长$_9$油层组中的原油运移方向,在纵向上是由上向下;由于长$_8$油层组原油主要来自长$_7$油层组(段毅等,2006),所以长$_9$油层组原油也来自长$_7$油层组。

3　油气输导体

在长$_9$石油运移中,盆地中孔隙型输导体分布很普遍。孔隙型输导体主要为河流-三角洲沉积砂体,包括河道、三角洲平原分流河道、水下分流河道、水下分流间湾、河口砂坝和前缘席状砂体等;同时,它们也是长$_9$油层组油藏的储层。由于受沉积环境和成岩作用等因素的影响,不同地区孔隙型输导体的疏导能力存在差别。古峰庄—元城地区长$_9$输导体砂岩的孔隙度分布范围为 14.72%～9.76%,渗透率为 1.22×10^{-3}～3.5×10^{-3} μm^2,疏导能力最好,是最有利的输导体砂岩的发育区。庆阳—长武地区长$_9$输导体砂岩的孔隙度为 3.20%～10.47%,渗透率为 0.09×10^{-3}～0.15×10^{-3} μm^2;高桥—洛川地区长$_9$输导体砂岩的孔隙度分布范围在 8.95%～10.15%之间,渗透率为 0.4×10^{-3}～2.5×10^{-3} μm^2,疏导能力较好,是较有利的输导体砂岩的发育区。

长期以来多数研究者认为,鄂尔多斯盆地周缘沉积盖层变形强烈,构造发育,而盆地内部沉积盖层变形较弱,断层和褶皱不发育,绝大部分地区的构造性质十分稳定,具有稳定型盆地的特征。但是越来越多的迹象显示,延长组石油聚集的范围内不仅有断裂(赵文智等,2003),而且有大量裂缝(张莉,2003),它们参与了石油的运移和聚集。对于长$_9$孔隙型输导体来说,虽然低渗砂岩疏导层内部存在非均一性,很可能形成输导体内部一些孔渗相对较好的优势通道,使运移的动力很容易克服疏导层内运移通道上的毛细管力而运移。但是,长$_7$烃源岩中石油,通过联通砂体的方式直接进入长$_9$储层难度较大,主要原因是二者之间有物性普遍较差的长$_8$油层组存在,石油运移则需要极高的动力作用,这就需要断层、构造裂隙沟通长$_7$烃源岩和长$_9$储层。因此,断层、构造裂隙输导体在长$_9$石油运移中可能起着重要的作用。郑希民等(2006,未发表资料)对古峰庄—红井子—白儿庄附近的地震剖面解译,发现了 6 条断层,这些断层呈 NS 向或 NW 向,分布在向斜轴部两侧附近,规模较小,穿过长$_7$和长$_9$油层组。因此,在古峰庄—元城地区,断层输导体在长$_9$石油运移中起到了重要的作用。张莉(2003)研究了陕北地区三叠系延长组裂缝,发现裂缝在该地区大面积发育,走向变化较小,产状相对稳定,破裂面与地层层面的方向垂直,大面积内不受局部构造控制,主要呈 E－W 向和 S－N 向分布。这说明,在高桥—洛川地区,破裂输导体在长$_9$石油运移中起到了重要的作用。因此,孔隙型输导体和断层、构造裂隙输导体是鄂尔多斯盆地长$_9$石油运移的主要输导体。综合上述,可以归纳为,盆地西部古峰庄地区长$_9$石油运移的输导体系为断裂-砂体模式,盆地东部高桥—洛川地区长$_9$石油运移输导体系为构造裂隙-砂体模式。

4　油气运聚模式

我们应用平衡深度法计算了鄂尔多斯盆地延长

组剩余压力，并且结合盆地长$_9$油层组石油来源、油气输导体系、油气运移路径等在盆地不同地区的特征，分区研究了长$_9$油气的运聚规律。

(1)古峰庄—元城地区：古峰庄—元城地区油气运聚规律具有其特殊性。从上面分析可知，古峰庄—元城地区位于天环凹陷，存在着断裂构造，这些构造是油气垂向运移的输导体；同时，该地区存在三角洲分流河道连片砂体，它们是油气运移的横向输导体。油源对比表明，该地区长$_9$原油主要来自长$_7$烃源岩。原油中性含氮化合物分馏效应纵向上反映了长$_9$原油来自长$_9$以上地层，这与油源对比和油气运移的纵向输导体分布研究结果是一致的。应用平衡深度法计算了该地区延长组剩余压力，研究结果表明，长$_7$油层组存在高过剩压力带(图 3)，并且长$_7$与长$_9$油层组之间存在较大的流体压力差。地下油气总是按照沿阻力最小的途径由相对高过剩压力区向相对低过剩压力区运移的总规律进行(Hunt，1990)。由上述研究区流体压力场特征可知，在纵向上，以长$_7$油层组为分界，以剩余压力作为运移动力，油气可以向下运移，进入储层物性相对好的长$_9$砂体聚集成藏。根据埋藏史、成岩史和储层包裹体特征研究表明(将有另文报道，下文相同)，该地区长$_9$油气主要运聚时间较晚，在早白垩世中晚期。

(2)高桥—洛川地区：高桥—洛川地区位于陕北古坳陷，该地区裂缝发育(张莉，2003；曾联波等，2007)，对于三叠系延长组低孔低渗砂体来说，这些裂缝沟通砂体，增大砂体渗透率，有利于长$_9$油气的纵向运移；同时，该地区存在三角洲分流河道连片砂体，它们是油气运移的横向输导体。油源对比表明，该地区

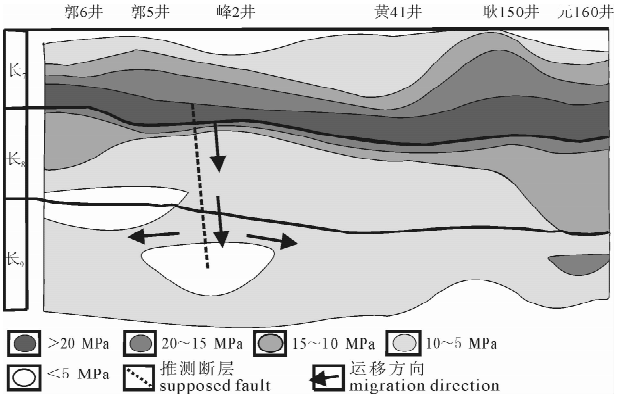

图 3 古峰庄—胡尖山地区长$_9$油气运聚模式

Fig. 3 Migration mode of crude oil from Chang-9 subsection of the Yanchang Formation at regions of Gufeng village to Hujian mountain

丹 48 井和丹 49 井长$_9$原油来自志丹—洛川长$_9$和长$_7$烃源岩；洛川地区的长$_9$原油来自华池—富县以南长$_7$烃源岩。原油中性含氮化合物分馏效应纵向上反映了长$_9$原油来自长$_9$以上烃源岩和长$_9$烃源岩。应用平衡深度法计算了该地区延长组剩余压力，研究结果表明，长$_7$和长$_9$油层组均存在高过剩压力带(图 4)，并且长$_7$与长$_8$油层组之间存在较大的流体压力差，长$_7$与长$_9$油层组之间存在一定的流体压力差，长$_8$与长$_9$油层组之间存在一定的流体压力差。这样在纵向上以长$_7$油层组为分界，以剩余压力作为运移动力，油气可以通过裂缝向下运移，与长$_9$烃源岩生成的原油一起，进入储层物性相对好的长$_9$砂体聚集成藏；另一方面，以剩余压力作为运移动力，长$_9$烃源岩生成的原油可以向上运移进入长$_8$砂体聚集成藏。根据埋藏史、成岩史和储层包裹体特征研究表明，该地区长$_9$油气主要运聚时间在早白垩世早中期。

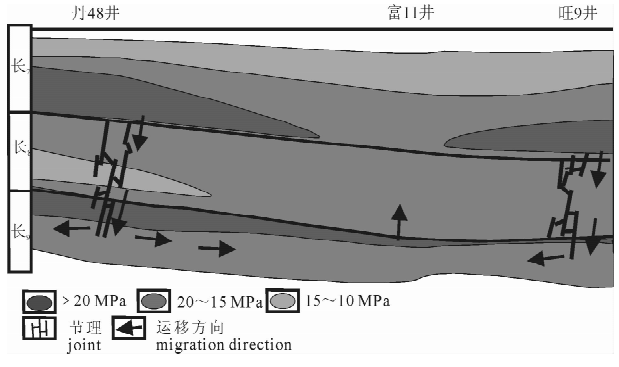

图 4 高桥—洛川地区长$_9$油气运聚模式

Fig. 4 Migration mode of crude oil from Chang-9 subsection of the Yanchang Formation at regions of Gaoqiao to Luochuan

(3)庆阳—长武地区：庆阳—长武地区目前发现的长$_9$油层组工业油流井位分布比较分散，仅仅包括长 20 井、正 6 井和正 10 井等极少数油井有长$_9$油层组石油产出。该地区许多井位资料证实构造裂缝系统非常发育，因此在油气纵向运移的疏导通道方面，裂缝应占据主导地位；同时，该地区存在三角洲分流河道连片砂体，它们是油气运移的横向输导体。油源对比表明，该地区长$_9$原油主要来自华池—富县以南长$_7$烃源岩。原油中性含氮化合物分馏效应纵向上反映了长$_9$原油来自长$_9$以上地层，这与油源对比和油气运移的纵向输导体分布研究结果是一致的。应用平衡深度法计算了该地区延长组剩余压力，研究结果表明，长$_7$油层组存在高过剩压力带(图 5)，

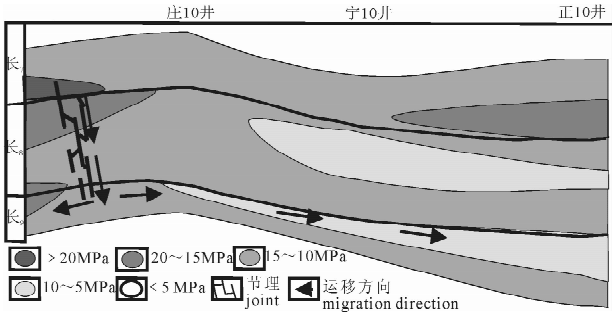

图 5　庆阳—长武地区长$_9$ 油气运聚模式

Fig. 5　Migration mode of crude oil from Chang-9 subsection of the Yanchang Formation at regions of Qingyang to Changwu

并且长$_7$与长$_9$油层组之间存在较大的流体压力差异。这样,在纵向上以长$_7$油层组为分界,以剩余压力作为运移动力,油气可以向下运移,进入储层物性相对好的长$_9$砂体聚集成藏。根据埋藏史、成岩史和储层包裹体特征研究表明,该地区长$_9$油气主要运聚时间在早白垩世早中期。

5　结论

鄂尔多斯盆地长$_9$油层组是一个新发现的含油层,该油层组及其下部长$_{10}$油层组(延长组最后一个油层组)在盆地内普遍缺乏好的烃源岩。因此,该油层组石油来自什么层位,怎样运移至长$_9$油层组,是一个油气成藏方面的科学问题,也是一个油气勘探开发迫切需要解决的实际问题。然而,该油层组油藏形成的油气运移机理研究还未见报道过。我们的油源对比发现,长$_9$油层组原油主要来自长$_7$烃源岩,只有在志丹局部地区来自长$_7$和长$_9$烃源岩;长$_7$、长$_8$、长$_9$和长$_{10}$油层组原油中咔唑类化合物异构体分布特征研究,同样证明了长$_9$油层组原油主要来自长$_7$油层组。孔隙型输导体和断层、构造裂隙输导体是鄂尔多斯盆地长$_9$石油运移的主要输导体;并且断层输导体主要分布在盆地西部,构造裂隙输导体主要分布在盆地东部和南部,它们对长$_9$油层组石油的纵向运移起到了重要的作用。盆地延长组剩余压力研究表明,盆地长$_7$油层组普遍存在高过剩压力带,长$_7$与长$_9$油层组之间存在较大的流体压力差,因此长$_7$油层组生成的油气可以向下运移,进入储层物性相对好的长$_9$砂体聚集成藏。根据长$_9$油层组石油来源、油气输导体系、油气运移路径和油气运移动力等油气运聚条件特征及其不同地区差异,建立了 3 种长$_9$油层组油气运聚模式,讨论了长$_9$油层组油气运聚机理。

参　考　文　献

段毅,吴保祥,郑朝阳,王传远. 2005. 鄂尔多斯盆地西峰油田油气成藏动力学特征. 石油学报, 26(4):29～33.

段毅,吴保祥,张辉,郑朝阳,王传远. 2006. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油地球化学特征及其成因. 地质学报, 80(2):301～310.

段毅,张胜斌,郑朝阳,吴保祥. 2007. 鄂尔多斯盆地马岭油田延安组原油成因研究. 地质学报,81(10):1407～1415.

付金华,罗安湘,喻建,毛明陆. 2004. 西峰油田成藏地质特征与勘探方向. 石油学报, 25:25～29.

李素梅,庞雄奇,黎茂稳,金之钧. 2002. 低熟油、烃源岩中含氮化合物分布规律及其地球化学意义. 地球化学,31:1～6.

赵文智,胡素云,汪泽成,董大忠. 2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用. 石油勘探与开发,30:1～5.

张莉. 2003. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析. 地质科技情报,22(2): 21～24.

赵孟军,宋岩,潘文庆,韩剑发,柳少波,秦胜飞. 2004. 沉积盆地油气成藏期研究及成藏过程综合分析方法. 地球科学进展, 19 (6) : 939～946.

王飞宇,金之钧,吕修祥,肖贤明,彭平安,孙永革. 2002. 含油气盆地成藏期分析理论和新方法. 地球科学进展, 17 (5) : 754～1762.

曾联波,李忠兴,史成恩,王正国,赵继勇,王永康. 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因. 地质学报,22(2):174～1180.

Duan Yi, Chaoyang Zheng, Zhiping Wang, Wu Baoxiang, Chuanyuan Wang, Zhang Hui, Xiaobao Zhang, Yaorong Qian, Guodong Zheng. 2006. Biomarker geochemistry of crude oils from Qaidam basin, northwestern China. J. Petrol. Geol., 29 (2): 175～188.

Hunt J M. 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment. AAPG Bull., 74(1): 1～12.

Hwang R J, Heidrick T, Mertani B, Qivayanti, Li M. 2002. Correlation and migration studies of North Central Sumatra oils. Organic Geochemistry, 33: 1361～1379.

Wang H D, Allen J, Philp R P. 1995. An organic geochemical investigation of oils and source rocks from two Mesozoic formations of Shanganning basin, China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 11: 277～288.

Oil Migration and Accumulation Rules of Chang-9 Oil-Bearing Formation in the Ordos Basin

DUAN Yi[1)], YU Wenxiu[1)], LIU Xianyang[2)], GUO Zhengquan[2)],
WU Baoxiang[1)], SUN Tao[1)], WANG Chuanyuan[1)]

1) *Key Laboratory of Gas Geochemistry Institute of geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Lanzhou, Gansu*, 730000;

2) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an*, 710021

Abstract

Chang-9 subsection of the Yanchang Formation is a new oil-bearing formation discovered in the Ordos basin. So far, the mechanism of oil migration and accumulation in the Chang-9 oil-bearing formation, especially oil migration, is still unknown. Resolving of this problem can perfect the theory of oil pool-forming in the Mesozoic Yanchang Formation in the Ordos Basin, and will play an important role in guiding oil exploitation and development. This paper focused on characters of source, transport system, migration pathway and power (so on) of oil in Chang-9 oil-bearing formation, and their differences in different areas. The results show that crude oil of the Chang-9 oil-bearing formation originated mostly from the Chang-7 subsection of the Yanchang Formation, with oil in the Zhidan region partially from Chang-7 and Chang-9 subsections. The Chang-9 crude oil migrates from upper to down. Pores in sandstone, structural fissures, and faults are dominant channels to transport crude oil. Overpressure zone commonly exists in the Chang-7 subsection of the Yanchang Formation and an apparent difference of fluid pressures between Chang-7 and Chang-9 subsections was also observed. Therefore, oil generated in the Chang-7 subsection can migrate downward driven by residual pressure in the overpressure zone, and charge in the Chang-9 sandstone reservoir with better physical property. This paper proposed three models of oil transport and accumulation for the Chang-9 oil formation and also discussed their mechnisams.

Key words: Ordos basin; Chang-9 oil-bearing formation; migration and accumulation conditions; migration and accumulation mechanism