

鄂尔多斯盆地中生界石油运移特征分析

席胜利^{1,2,3}, 刘新社^{1,3}, 王 涛³

(1. 西北大学, 陕西 西安 710069; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 鄂尔多斯盆地中生界构造简单平缓, 储层主要为低孔、低渗, 油气运移独具特色。侏罗系和延长组上部储集层孔隙度、渗透率条件较好, 油气运移聚集驱动力以浮力为主, 三叠系顶部不整合面和侏罗系古河道砂体共同构成了侏罗系油藏的油气主要运移通道, 其油气主要分布在侏罗系古河道内及不整合面附近。延长组中下部储集层在石油大量生成时期, 储集层已非常致密, 地层基本丧失水交替能力, 异常压力为石油二次运移的主要动力, 石油沿渗透性砂体主要向东北和西南两大方向运聚成藏, 多分布在生烃中心及周边地区。

关键词: 运移动力; 运移通道; 运移方向; 中生界; 鄂尔多斯盆地
中图分类号: TE122. 1 **文献标识码:** A

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、地层平缓(倾角不足 1°), 中生界地层蕴藏着丰富的石油资源。资源评价表明, 盆地石油地质资源量为 $85.88 \times 10^8 \text{t}^{[1]}$, 资源潜力十分巨大。

鄂尔多斯盆地晚三叠世沉积了一套湖相—三角洲相的千余米碎屑岩建造, 发育一套半深湖—深湖相的有效烃源岩, 形成湖盆北部和东北部的北东—南西向三角洲储集体和湖盆西南部的西南—东北向三角洲储集体, 以细粒、致密, 低渗为特征^[2]。晚三叠世末, 印支运动使盆地整体抬升接受剥蚀, 在古侵蚀地貌的背景上, 侏罗纪沉积了早期的填平补齐式的河流相和晚期的湖沼相, 在三叠系上部深切河谷中充填的粗粒、高孔渗的河流相砂体和晚期形成的三角洲分流河道砂体构成了侏罗系的储集体, 主要表现为中粗粒、中孔高渗的中孔渗储层^[3]。

一套烃源岩、两套碎屑岩储集体, 在平缓的构造背景下, 通过石油的生成、运移和聚集, 形成了中生界自生自储或下生上储、隐蔽性强的岩性含油组合, 构成了盆地广泛分布的油藏(图 1)。因此, 进行盆地中生界石油的运移特征分析, 对石油勘探具有重要的指导意义。

1 油气二次运移动力分析

对于常规储层, 油气二次运移的相态主要以游离相为主, 运移动力主要是浮力和水动力^[4]。对于鄂尔多斯盆地中生界储层而言, 由于上下两套储层物性的差异, 浮力、水动力和异常压力在油气运移中的作用产生分异。

1.1 浮力

在油气二次运移中, 浮力大于毛管阻力才能促成油气在储层中的运移。三叠系延长组主要属三角洲—河流相砂岩储层, 物性差, 非均质性强, 具有低孔、低渗、低含油饱和度等特征; 同时可分为上、下两套含油组合。延长组下部含油组合(长 4+ 5 油层组以下), 油藏基本无边水、底水, 实际油柱高度统计困难, 理论计算油相连续临界高度多大于 100 m; 若把早白垩世末(油气主要运移期)地层倾角按 0.5° 计算, 则得出的克服毛细管阻力所需油相的连续长度最小为 11.5 km, 与目前延长组下部(以长 6 为主)已发现油藏含油带宽度(< 5 km)相比, 计算的油相连续长度远大于已发现油藏含油带宽度, 说明延长组低渗储层浮力不是油气运移的主要动力。而延长

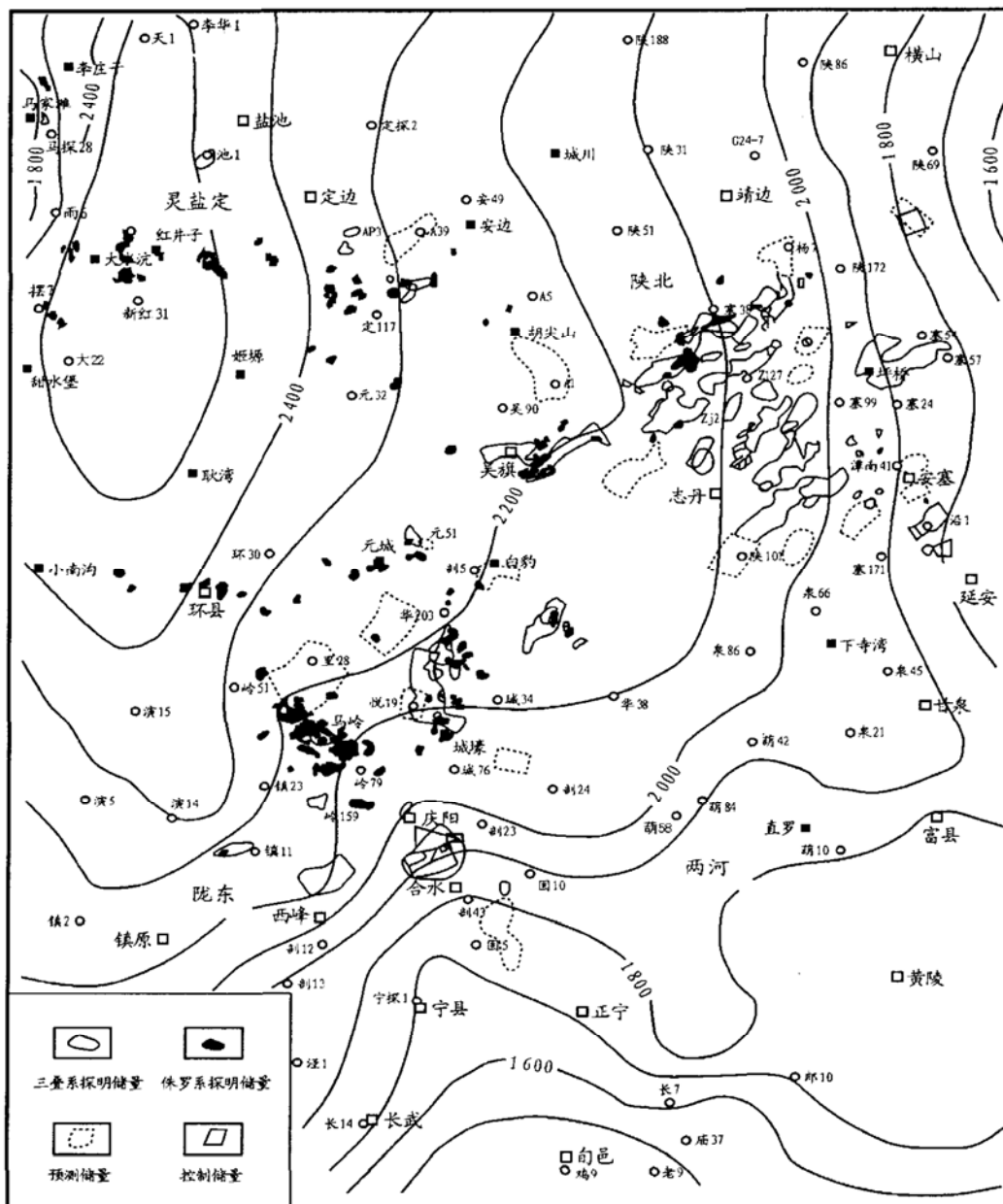


图1 鄂尔多斯盆地中生界油藏分布图

Fig. 1 Distribution of the Mesozoic oil pools in the Ordos Basin

组上部含油组合(长1—长3)统计的实际油柱高度与需要克服的理论油柱高度均接近于40 m,油藏底水特征也较为明显,说明浮力在延长组上部油层组中对油气的运移具有重要的作用。

侏罗系延安组油层主要属河流相砂岩,储层物性、均质性均好于延长组,具有中孔、中—低渗不均匀孔喉型和混杂孔喉型的特点,把各类储层实际油柱连续高度与对应储层克服毛管阻力所需理论油柱高度相比较,发现二者很为接近,一般为30~40 m,说明浮力在延安组油气运移中起了相当重要的作用,侏罗系油藏中具有明显的底水特征也说明这一特点。

因此,浮力作为盆地中生界油气的二次运移动力,其影响在纵向含油组合上出现了分化:随含油层

位变老,储层埋深的增加,浮力所起的作用逐渐减弱,一般体现于侏罗系和延长组上部。

1.2 水动力

鄂尔多斯盆地晚三叠世以来经历了晚三叠世、侏罗纪及白垩纪—现今3期水文地质旋回演化过程^[5]。研究表明,地史期异常热事件和地层埋深的共同作用是异常高古地温场形成的基础,在其影响下中生界延长组有效烃源岩在晚侏罗世—早白垩世末达到成熟并进入生、排油高峰期和油气运聚成藏期^[6~8],因此白垩纪—现今期间地下水水动力场演变左右了中生界油气的二次运移动力。

1.2.1 延长组地下水水动力场特征

地层古厚度恢复结果表明,由于延长组地层在自身快速沉积作用下,遭受了早期的快速压实作用,

孔隙急剧减小,使大量自由水排出,甚至部分吸附水被挤出。因此延长组在经过了晚三叠世、侏罗纪两个水文地质旋回后,压实程度已很高,在延长组长4+5以下,局部地区已经出现丧失水交替能力或基本丧失水交替能力的封闭体系,开始形成异常高压。

早白垩世后,盆地下沉接受巨厚的志丹组沉积,使延长组埋藏深度超过2500m,流体压力达到25 MPa以上,再次遭受压实和流体损失。其结果使延长组泥岩总孔隙度损失累计达到73.3%,当期损失18.4%;砂岩孔隙度损失累计达到65.9%,当期损失23.8%。通过对比可以看到,白垩世—现今水文地质旋回期间延长组泥岩和砂岩在该时期压实过程中的排水量已经大大降低,大约只有侏罗纪之前排水量的1/5。所以,水交替强度已很小,地层基本丧失水交替能力,封闭体系相对发育,加之该期石油的大量生成,水热增压作用明显,造成异常高压普遍形成,成为油气二次运移的主要动力。

1.2.2 延安组地下水水动力场特征

与延长组地下水水动力场演化相比,延安组地下水水动力场相对较为简单。在侏罗纪水文地质旋回期间,延安组上覆沉积物相对较小,压实作用不完全,残留有较多的孔隙水,水动力交替较强。随着下白垩统志丹组沉积,延安组强烈压实,除在西部坳陷区局部形成水动力交替较弱的地区可能产生异常压力外,在盆地大部分地区基本上处于正常的水动力场中,使延长组生成的油气与压实作用形成的水流一起进入侏罗系底部,在水动力和浮力的共同作用下一起向谷间高地运移,遇到圈闭后聚集成藏。

2 油气二次运移通道分析

油源对比表明,侏罗系和延长组上部油藏是下部油气大规模运移聚集的结果^[9,10],砂体、古侵蚀面(古沟槽)及断裂或微裂缝系统是中生界油气二次运移的主要通道^[11]。

2.1 砂体

从大面积的三角洲砂体分布、地层砂泥岩含量及延10砂体与油藏分布的关系来看,砂体是中生界油气的主要运移通道。

2.1.1 延长组砂体大面积复合连片

延长组三角洲砂体和河流砂体发育,具有砂体厚度大、分布面积广、复合连片等特点。其中紧邻主力生油层长7段的长6段,围绕湖盆发育众多的湖泊三角洲砂体,砂层总厚50~90 m,单砂层厚5~20

m,在横向上大面积复合连片,为油气的侧向运移提供了良好的通道。纵向上的相互叠置同样为油气垂向运移提供了良好的通道。盆地内砂体的纵向组合分为3种类型(图2):1)湖进型砂体组合方式,形成油气向下穿层运移的良好通道;2)湖退型砂体组合方式,形成油气呈阶梯状向上穿层运移的良好通道;3)稳定型砂体组合方式,有利于油气垂向运移。

2.1.2 侏罗系底部的河床相复合砂体即是油气的输导层,更是油气的良好储集层

晚三叠纪末古河道中充填的侏罗系大型板状砂岩,侵蚀和切割延长组油源岩,首先接受延长组运移上来的大量油气,其次沿输导层向低势区或是向上或是向两侧层间运移,并圈闭于上倾方向的超覆尖灭处或渗透性变异处或差异压实构造之中,形成如马岭油田等油藏。

2.2 古侵蚀面

油气运移过程中,原油极性及其结构随输导途径、输导方式的改变而产生规律性变化,从而表征油气运移方向^[12]。

表1反映的是陇东地区油层组原油结构在古侵蚀面上、下所发生的明显变化,原油结构的指标自延长组经侵蚀面至延安组呈现规律性降低。原因在于油气在沿侵蚀面运移过程中,原油中芳烃共轭双键体数降低,亦即芳核丰度降低;沥青质中类长链饱和烷烃及具一个单独H原子的稠环芳核物质逐渐增加,而甲基丰度减小,从而导致沥青质中吸收光谱指标由延长统至延安组出现规律性增大。

马岭油田不同油层组原油沥青质有机元素组成的纵向变化(表2),同样可以说明原油经侵蚀面运移的变化。

2.3 断裂及微裂缝

近年来,从盆地周边露头如延河剖面、宜川剖面、清涧河剖面,到盆地腹地的岩心如盆地南部的宁探1井和东北部的ZJ23井,盆地内三叠系延长组地层中均发现有天然裂缝的存在,这些裂缝的存在促进了纵向油源的沟通。地球化学资料和勘探开发实践已证实断裂是油气运移的通道之一^[13~15],但对于断裂的发育规模、分布规律、是否为主要运移通道仍需进一步研究。

3 油气二次运移方向分析

3.1 原油物性反映的油气运移方向

前苏联学者卡西莫夫根据石油中甲烷含量及气油比建立了定量判别油气运移方式的诺模经验图,

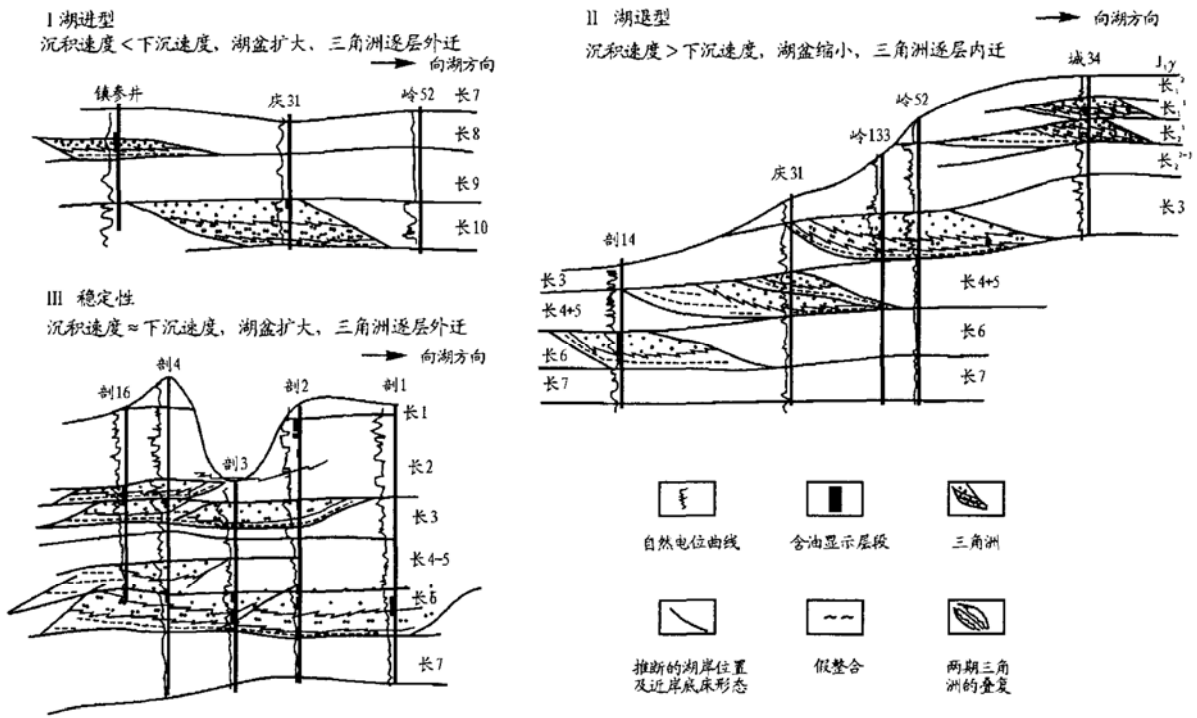


图2 延长组三角洲砂体组合类型示意图

Fig. 2 Schematic maps showing the assemblage types of delta sandbodies in the Yanchang Formation

表1 马岭油田各油层组原油结构变化特征表

Table 1 Changing characters of crude oil structures for various oil reservoirs in Maling oilfield

井号	层位	原油			沥青质		
		$\frac{1\ 600\ \text{cm}^{-1}}{720\ \text{cm}^{-1}}$	$\frac{1\ 600\ \text{cm}^{-1}}{1\ 380\ \text{cm}^{-1}}$	$\frac{860\ \text{cm}^{-1}}{720\ \text{cm}^{-1}}$	$\frac{700\ \text{cm}^{-1}}{1\ 380\ \text{cm}^{-1}}$	$\frac{860\ \text{cm}^{-1}}{1\ 380\ \text{cm}^{-1}}$	$\frac{860\ \text{cm}^{-1}}{720\ \text{cm}^{-1}}$
木1	延9	0.55	0.23	0.55	0.26		
	延10	0.40	0.18	0.55		0.46	1.82
	长3	1.19	0.48	0.93	0.26		
岭132	延10	0.36	0.19	0.55	1.23	0.44	0.36
岭132	富县	0.87	0.53	0.55	0.91	0.43	0.47
岭131	长2	0.87	0.58	0.99	0.47	0.43	0.90
岭104	长6	0.86	0.38	0.83	1.03		
	长7	1.10	0.59	0.92	0.71	0.33	0.80
	长10				0.41		
阳17	长6	0.85	0.51	0.95	0.47		
	长8	0.83	0.42	0.90	0.23		

表2 马岭油田原油沥青质有机元素组成的纵向变化表

Table 2 Vertical variation of organic element composition in the asphaltene of crude oil from Maling oilfield

井号	层位	H/%	(O+ N+ S)/%	H/(O+ N+ S)	备注
岭132	延10	9.18	28.28	0.32	长2参考岭131及中98井资料
	Jf	9.40	11.55	0.81	
	长2	10.69	7.99	1.34	
岭261	延9	8.83	6.36	1.39	长2参考中98井资料
	延10	9.88	5.45	1.81	
	长2	10.69	5.95	1.80	
木1	延9	9.14	6.74	1.36	
	长3	10.29	7.31	1.41	
岭405	延10	8.37	8.95	0.94	长2参考中98井资料
	长2	10.69	5.98	1.80	

利用各资料点所对应的系数值来定量判别垂向和侧向石油运移的程度。依据该方法,作者绘制了中生界不同地区、不同层系油藏的原油物性关系平面图,反映盆地中生界油气运移方向和运移方式具有以下特点。1) 陇东地区(图3): 延长组油藏具有近源就地聚集特征,水平和侧向运移距离均较小,侏罗系油藏主要以垂向运移为主,侧向运移相对较弱,表现为油藏随层位变新垂向运移系数明显增大,侧向运移系数相对较为集中,在陇东、灵盐定及吴旗地区,油层侧向运移体现为以古河道为中心、从古河道向两侧运移(图1)。2) 陕北地区(图3): 延长组油气具有较长的运移距离,从长6油藏到长2油藏,垂向运移系数和侧向运移系数均有明显变大,且随着运移程度的增加,长6油藏到长2油藏具有明显的分异性,说明该区油气具有阶梯状爬坡运移的特征,主要表现为从生油中心沿三角洲砂体的展布,向东北方向运移系数依次增高。

3.2 构造演化判别油气运移方向

延长组油气运聚成藏主要受油层组大的区域构造面貌所控制,而主要生油层长7段在晚侏罗世末和早白垩世末的构造格局表明,油气运移具有以下特点:1) 以环县—甘泉一线为界,北部古构造较南部平缓;2) 定边—吴旗—甘泉相对低凹带构成盆地南部中生界油气运移的分隔槽,油气自生烃中心向东北、西南两个方向大规模运移;3) 分隔槽以北,构造格局呈现为东高西低,油气有从西向东穿过构造线和从南向北沿构造走向运移的趋势;4) 分隔槽以南,庆阳—宁县—合水一带存在一大型隆起带,其前端指向生油中心,为油气运移聚集的指向区(图1)。

通过不整合面与油气运移聚集关系分析以及多年的中生界石油勘探实践表明,侏罗系油气运移聚集主要受控于晚三叠世以后的古侵蚀面和古洼槽。从延安组沉积开始至早白垩世油气大规模运移聚集成藏期,陇东地区古构造面貌基本受古侵蚀面控制(图1),呈现东低西高的格局,原油地化资料平面变化显示油气由东北向西南方向运移,油气的富集程度由西向东逐渐变差。

3.3 过剩异常压力判别油气运移方向

采用平衡深度法计算结果表明,盆地南部中生界地层泥岩在一定深度下均存在有异常压力,且具有从西向东异常压力出现的层位逐渐变老的特点。但实际盆地中生界地层实测压力基本无异常反映。这一现象说明,早白垩世以后的盆地剥蚀未能得以补偿,目前地层压力是中生界地层经过抬升剥蚀、压力重新调整的结果。平衡深度法所计算的过剩异常

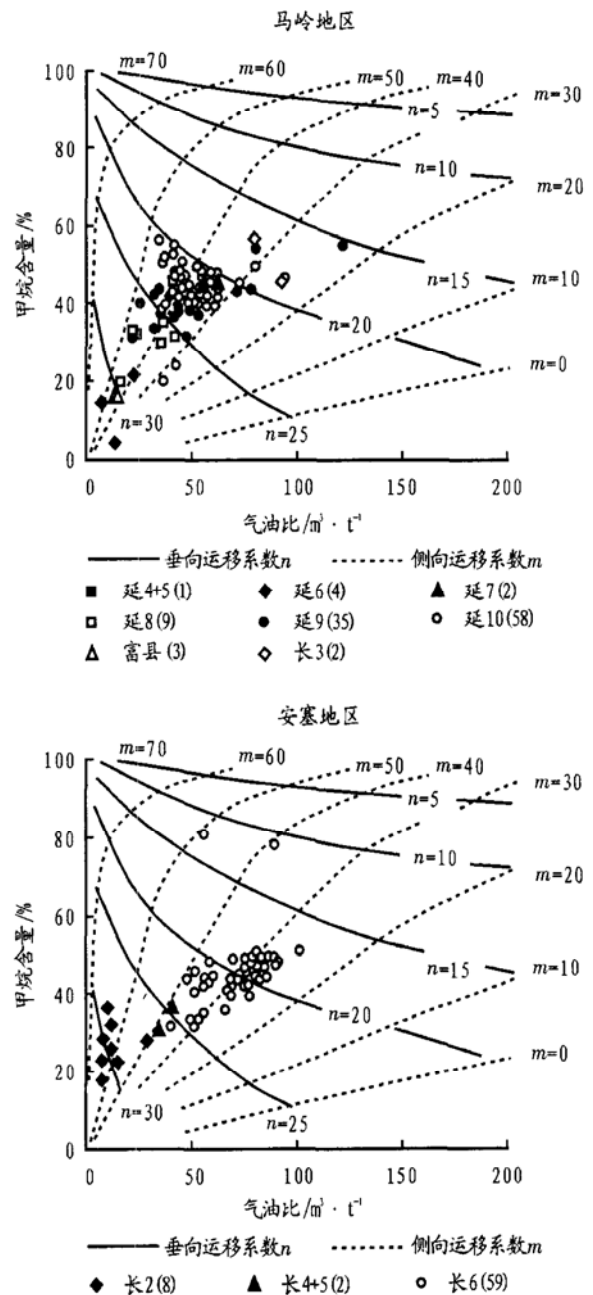


图3 中生界原油物性关系的卡西莫夫图解

Fig. 3 Kasimovian diagrams showing relationships among the petrophysical properties of the Mesozoic crude oil

压力则应更接近盆地欠补偿以前的地层流体压力,即最大古埋深时(早白垩世)的流体压力分布,最大埋深期恰好对应于油气的主要运聚成藏期。

盆地中生界地层在早白垩世末的过剩异常压力场特征(图4)表现为以下几方面:1) 过剩异常压力较小,且主要分布于延长组,异常压力幅度多小于5 MPa,反映油气的运移动力相对较弱,造成了油气的分散分布。2) 不同地区单井过剩异常压力反映油层穿层运移条件相差较大。灵盐定地区异常压力起始层位在下侏罗统,油气向上穿层作用较强,侧向受岩性变化影响,运移相对较弱;两河地区(洛河、葫芦河)稳定过剩压力起始层位为延长组顶部,过剩异常压力幅度大,但由于其始终位于湖相沉积区,油气穿

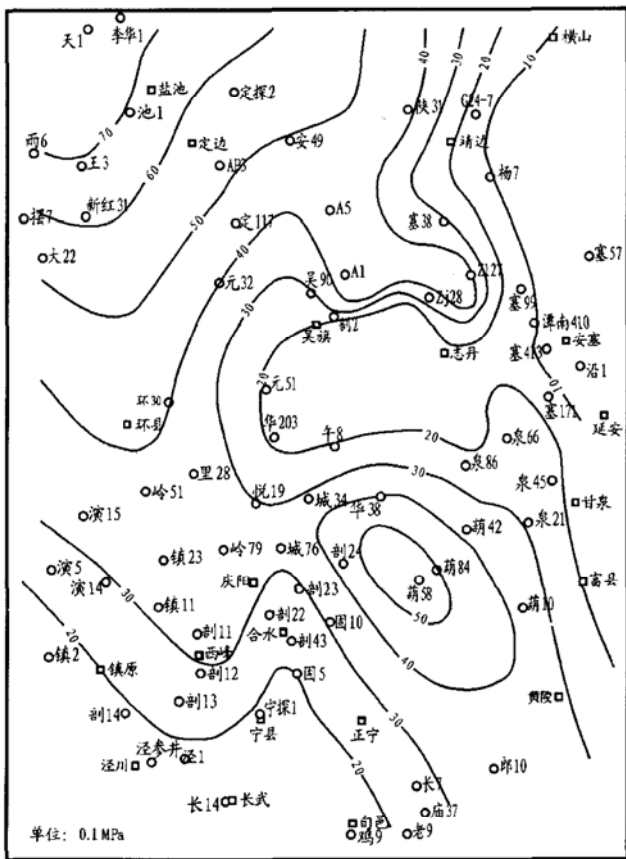


图4 鄂尔多斯盆地中生界石油主要运聚期异常压力分布

Fig. 4 Distribution of abnormal pressure in the main periods of the Mesozoic petroleum migration and accumulation in the Ordos Basin

层运移阻力相对侧向运移阻力大,穿层运移作用相对较弱;陇东、吴旗地区岩性较粗,古河道切割明显,地史期过剩压力虽不及灵盐定和两河地区,但其穿层运移作用要比两河地区强得多;陕北及其以东地区,过剩压力始终相对较低,稳定异常起始层位深、岩性粗且侧向分布稳定,有利于油气侧向运移。3)定边—吴旗—甘泉一带存在一高压封隔槽,反映出油气沿该分隔槽向东北和西南两个方向运移。4)古河道切割形成局部压力释放带,在一定程度上破坏了延长组的压力保存条件。长6剩余压力分布显示在吴旗—志丹一带有一过剩压力极低区存在,长2剩余压力分布图显示沿甘陕一级古河道中央有一低过剩压力带形成。5)过剩异常压力分布格局具明显继承性,基本格局为西北地区过剩压力最为发育、幅度最高,东南地区次之,东北与西南相对较低。因此,陇东和陕北地区由于始终处于过剩压力低值区,从而成为油气运聚成藏的最有利地区。

4 结论

通过对盆地中生界油气运移特征的分析,可以

取得以下认识。

1) 由于盆地中生界两套储层物性的差异,油气在二次运移中的动力产生分异。三叠系延长组压实作用强烈,物性较差,异常超压为油气的主要运移动力;侏罗系延安组压实较弱,物性较好,浮力和古水动力对油气运移有较强的影响。

2) 延长组三角洲砂岩的纵横向复合连片和叠置,构成三叠系油气的运移通道;侏罗系河道砂体的复合,形成油气进入侏罗系后的输导层。

3) 地球化学指标和勘探成果均表明,侏罗系古侵蚀面、断裂和裂缝是油气运移的重要通道。

4) 陇东地区的油气在延长组的水平和垂向运移距离小,具有就近聚集的特征;在延安组主要体现为垂向运移。陕北地区延长组油气的水平运移距离较长,并具有沿层阶梯状爬坡运移的特征。

5) 异常压力分布显示,在定边—吴旗—甘泉一带存在高压分隔槽,油气沿此分隔槽分别向东北的陕北地区和西南的陇东地区运移,同时两个地区处于过剩压力低值区,是油气运移聚集的最有利地区。

6) 油气主要运聚期的古构造分析表明,在分隔槽以北构造平缓,有利于油气的长距离运移;而以南的庆阳—宁县—合水一带存在一个大型鼻状隆起,有利于油气的聚集。

参考文献:

- 1 胡文瑞,何自新. 鄂尔多斯盆地油气勘探大发展启示[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 1~ 4
- 2 陈安宁,韩永林,杨 阳等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长统成藏地质特征及油藏类型[A]. 见: 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集, 1990—2000[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 33~ 46
- 3 吕 强,郭正权,潘令红等. 鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田的形成条件与分布规律[A]. 见: 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集, 1990—2000[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 47~ 57
- 4 李明诚. 石油与天然气运移研究综述[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 3~ 10
- 5 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十二),长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 156~ 174
- 6 赵孟为. 鄂尔多斯盆地油气形成运移时间和运移方向的确定与勘探方向[J]. 石油实验地质, 1996, 18(4): 341~ 347
- 7 周江羽,吴冲龙,韩志军. 鄂尔多斯盆地地热场特征与有机质成熟史[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 20~ 24
- 8 Zhao Mengwei, Hans J B, Hans A. Thermal and tectonic history of the Ordos Basin, China: evidence apitite fission track analysis, vitrinite reflectance and K-Ar dating[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80: 1 110~ 1 134
- 9 张文正,裴 戈,关德师. 鄂尔多斯盆地中、古生界原油单体系列碳同位素研究[J]. 科学通报, 1992, 37(3): 248~ 251
- 10 罗 霞,李 剑,胡国艺等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤生、排油能力实验及形成煤成油可能性探讨[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 76~ 80

- 11 王道富, 张明禄. 鄂尔多斯盆地中生界石油滚动勘探开发技术[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 82~ 88
- 12 黄第藩, 王则民, 石国世. 陕甘宁地区印支期古地貌特征及石油地质意义[A]. 见: 中国陆相大油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997, 239~ 247
- 13 张文正, 黄月明, 宋国初等. 陕甘宁盆地上三叠统有机生物成因次生淡水方解石的发现及地质意义[J]. 科学通报, 1996, 41(18): 1 689~ 1 691
- 14 方国庆, 刘德良. 鄂尔多斯盆地中部东西向天然气聚集区带研究[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 146~ 151
- 15 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 34~ 37

ANALYSIS ON THE MIGRATION CHARACTERISTICS OF THE MESOZOIC PETROLEUM IN THE ORDOS BASIN

XI Sheng-li^{1, 2, 3}, LIU Xir-she^{1, 3}, Wang Tao³

(1. Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. Beijing 100029, China; 3. Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Branch Company, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: The Mesozoic structures in the Ordos Basin are simple and smooth, with reservoirs mainly of low porosity and low permeability and distinctive hydrocarbon migration. The conditions of porosity and permeability are better in the Jurassic and the upper reservoirs of the Yanchang Formation, and the driving forces of hydrocarbon migration and accumulation are dominated by buoyancy. The surfaces of unconformity on the top of the Triassic and the paleochannel sandbodies of the Jurassic constituted the major migration pathways of hydrocarbon in the Jurassic oil pools, and the oil reservoirs were distributed mainly in the Jurassic paleochannels and the places near the surfaces of unconformity. During the period of a large amount of petroleum creation, the middle and lower reservoirs of the Yanchang Formation were very dense, and the formations basically lost water alternating ability. Abnormal high pressure then exceeded static buoyancy and became the main dynamic of secondary petroleum migration. Permeable sandstone was the main petroleum migration pathway to northeast and southwest, and oil reservoirs were distributed chiefly in hydrocarbon-generating centers and regions around them.

Key words: migration drive; migration pathway; migration direction; Mesozoic; the Ordos Basin