

文章编号: 1000-0550(2008)02-0349-06

鄂尔多斯盆地马岭油田延 9 油层组油气运移研究^①

段 毅 吴保祥 郑朝阳 孙 涛 王建功

(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 兰州 730000)

摘 要 我们首次对马岭油田延 9 油层组原油充注点和运移方向、期次、通道及动力进行了系统地研究。结果表明,马岭油田延 9 油层组原油中卟啉类化合物的运移分馏效应明显,不同地区原油样品中卟啉类化合物异构体分布特征反映了延 9 原油具有 3 个充注点,运移方向为向南东方向和向北西方向运移;纵向上是由下向上,即从延 10 以下层向上运移的方向。油藏储层包裹体均一化温度分布呈现出两个主峰温度,说明油气经历了两次运移期和充注期。研究资料显示马岭油田延 9 油层组原油运移通道在纵向上主要是河道深切谷和延 9 与延 10 油层组河道砂体的相互纵向叠置直接接触部位,或者是延 10 油层组泥岩很薄处形成的油气运移窗口;横向上为联通的多分支河道。油气运移的纵向动力主要为毛细管力和剩余压力。该研究成果对鄂尔多斯盆地侏罗系油气的进一步勘探和开发具有一定的指导意义。

关键词 鄂尔多斯盆地 马岭油田 地球化学 油气运移

第一作者简介 段毅 男 1956 年出生 博士 研究员 博士生导师 油气地球化学和有机地球化学

E-mail duany@ns.lzb.ac.cn

中图分类号 TE122.1 **文献标识码** A

鄂尔多斯盆地可以划分为六个一级构造单元^[1],马岭油田位于盆地伊陕斜坡构造单元的南西部(图 1),它是鄂尔多斯盆地发现最早的油田之一,该油田自 1970 年发现,1971 年进入全面开发以来,至今已有 36 年的历史。前人对马岭油田石油地质研

究做了大量卓有成效的工作,结果表明油田所在构造是由古地貌控制、经差异压实作用而形成的一个平缓鼻状隆起带;原油主要赋存于侏罗系延安组地层之中,该地层由河流和湖沼沉积碎屑岩构成,自上而下也分成 10 个油层组(延 1—延 10),其中河流砂岩和

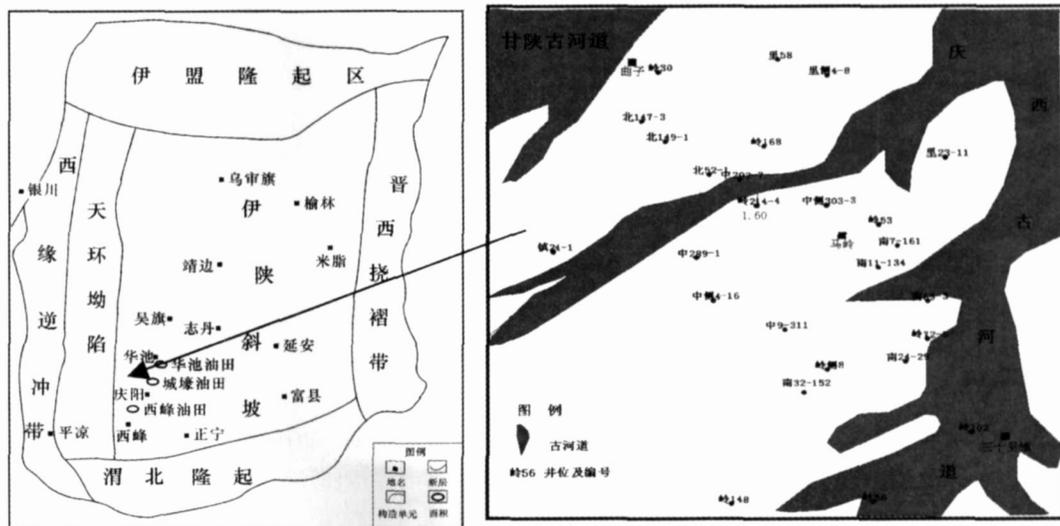


图 1 马岭油田构造位置和样品井位分布

Fig 1 Tectonic units of the Ordos basin and study area showing the Maling oilfield and sampling locations

① 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2005CB422105)和国家自然科学基金项目(批准号: 40772069 和 40642007)资助。

收稿日期: 2007-03-23 收修改稿日期: 2007-07-26

三角洲前缘砂岩成为延安组重要的储集岩。延 9 油层组为主力油层之一,它的储量占总储量的 35.9%。延 9 油藏的成藏研究,不仅对指导鄂尔多斯盆地侏罗系石油勘探和开发具有重要的作用,而且可以总结这类油藏的成藏机制,为陆相生油理论增加新的内容。可是,以往马岭油田延 9 油藏成因研究主要通过地质方法,而对源岩和原油地球化学研究很少,特别是油气运移的地球化学研究还未见报道过。延 9 油层组原油充注点和运移方向、期次、通道及动力等有关油气运移问题,对马岭油田延 9 油藏形成起着重要作用,倍受人们的关注。本文对马岭油田延 9 油藏原油含氮化合物和储层包裹体均一化温度进行了分析,并结合我们对延 9 油层组沉积相和延长组流体压力研究资料,对这些科学问题首次进行了系统地研究。

1 样品与分析

原油样品采集于马岭油田,样品井位分布和产层见图 1 和表 1。原油含氮化合物分离采用两步分析流程(图 2)^[2]。咔唑类化合物气相色谱—质谱分析(GC—MS)是在 Finigan SSQ710 型 GC—MS 仪器上进行。色谱柱为 HP-5 型弹性石英毛细管柱(30 m×0.25 mm i.d.,膜厚 0.25 μm),氦气作为载气。升温程序:始温 80 °C,以 2 °C/min 速率升至 150 °C,然后以 3 °C/min 的速率升至 310 °C,恒温 25 min。质谱仪采用多离子检测(MID),电子能量 70 eV。样品加入 5 μL 氮—苯基咔唑作为内标。

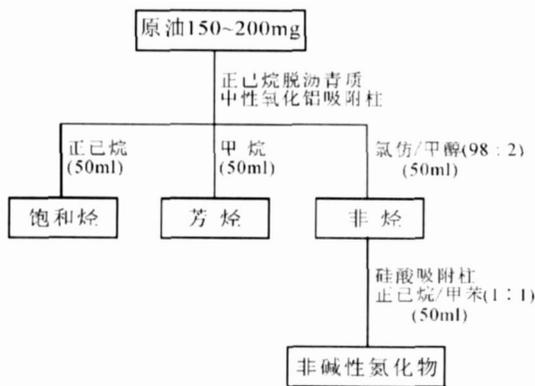


图 2 含氮化合物分析流程

Fig 2 Analytical procedure of neutral nitrogen compounds in the studied crude oils

为了研究油气运移期次,对岭 86 井延 9 储层包裹体均一化温度进行了测定,所用仪器为 ZEISS AX-10SKOP 多功能显微镜和 LINKAM 液氮型冷热台。

2 结果与讨论

2.1 油气充注点、运移方向和运移期次

马岭油田延 9 油层组原油含有丰富的咔唑类化合物。它们主要由咔唑、C₁~C₃ 咔唑和苯并咔唑系列所组成(表 1)并且以三甲基咔唑系列为主,占 46.11%~56.48%,其次为二甲基咔唑系列化合物,它们分布在 37.41%~44.32%之间,甲基咔唑系列所占的比例也较高,为 4.65%~7.52%,咔唑和苯并咔唑系列相对含量很低,分别为 0.31%~1.19%和 0.66%~1.48%。在二甲基咔唑系列中,半屏蔽异构体(PSNs)相对含量最高,为 54.11%~62.09%,其次为暴露异构体(ENs)占 18.42%~32.81%,屏蔽异构体(1,8-DMC)相对含量最低,为 13.22%~19.12%。已有的研究表明,原油中咔唑类化合物组成特征主要受油气运移过程中的分馏效应所控制^[3~7],同时成熟度,母质性质和沉积环境也对其组成有影响^[2,8]。马岭油田延 9 油层组中原油咔唑类化合物组成的相似性,某种程度上与它们来自同一油源相吻合^[9]。另外,马岭油田延 9 油层组中原油咔唑类化合物组成与西峰油田原油中的相比较^[10],前者含有比较多的三甲基咔唑系列和屏蔽异构体,含有比较少的咔唑,这可能说明马岭油田延 9 油层组中原油经历了比西峰油田原油更长的运移距离。这与它们的地质情况相符合,西峰油田原油主要赋存于长 8 油层组,临近长 7 主力烃源岩。

原油中咔唑类化合物分布特征是研究油气充注点和运移方向的有效途径。这是因为原油中含有氮原子杂环的咔唑类化合物具有强的极性,通过 N—H 原子与地层中的固体有机质或粘土矿物的负电性原子(如氧)形成氢键^[9,11],以致能被它们所吸附。因此,在石油运移过程中,含氮化合物的绝对丰度逐渐降低。不同类型的咔唑类化合物被吸附的强度程度有差异,产生了咔唑类地质色层分馏效应。烷基咔唑系列的吸附强度按屏蔽型异构体(如 1,8-二甲基咔唑)、半屏蔽型异构体(如 1 甲基咔唑、1,3-二甲基咔唑等)和暴露型异构体(如 3 甲基咔唑、2,7-二甲基咔唑等)次序递增。因此,随着运移距离的增加,屏蔽型异构体相对富集,暴露型异构体相对减少^[12]。

油源对比表明,所研究的马岭油田原油来自同一油源,即延长组烃源岩^[12]。因此,它们的咔唑类化合物分布受源岩性质和成熟度影响极小,主要受控于油气运移分馏作用。我们选择了咔唑类化合物异构体

表 1 鄂尔多斯盆地马岭油田延 9 油层组原油咪唑类化合物组成
Table 1 Compositions of pyrrolic nitrogen compounds in Yan-9 crude oils

井号	层位	不同咪唑类化合物相对组成				不同异构体相对组成			
		C/%	MC/%	DMC/%	TMC/%	BC/%	1,8-DMC/%	PSNs/%	ENs/%
南 11-134	延 9	0.56	6.05	41.28	51.45	0.66	18.06	62.09	19.85
中 9-311	延 9	0.55	5.96	42.48	50.11	0.89	16.84	61.82	21.34
南 7-161	延 9	0.38	5.63	40.43	52.85	0.70	17.34	59.00	23.66
中 202-2	延 9	0.31	5.24	39.72	53.88	0.85	13.22	53.98	32.81
岭 214-4	延 9	0.47	5.04	41.25	52.46	0.78	16.09	59.93	23.98
中 289-1	延 9	0.40	4.68	37.41	56.48	1.03	13.34	54.11	32.56
中侧 4-16	延 9	0.35	4.65	39.41	55.12	0.47	18.93	62.64	18.42
里侧 4-8	延 9	0.45	6.80	42.72	49.45	0.57	16.48	59.84	23.68
演 13	延 9	1.19	7.52	39.01	51.05	1.23	19.12	61.26	19.62
北 52-1	延 9	0.72	7.05	43.86	47.32	1.05	15.05	61.00	23.96
北 147-3	延 9	0.71	7.39	44.32	46.11	1.48	14.20	58.64	27.16
南 32-152	延 9	1.11	6.22	39.96	51.73	0.98	16.25	61.44	22.31

注: C—咪唑; MC—甲基咪唑; DMC—二甲咪唑; TMC—三甲咪唑 (A+B+C); BC—苯并咪唑; 1,8-DMC—1,8-二甲咪唑; PSNs—部分屏蔽型; ENs—全暴露型。

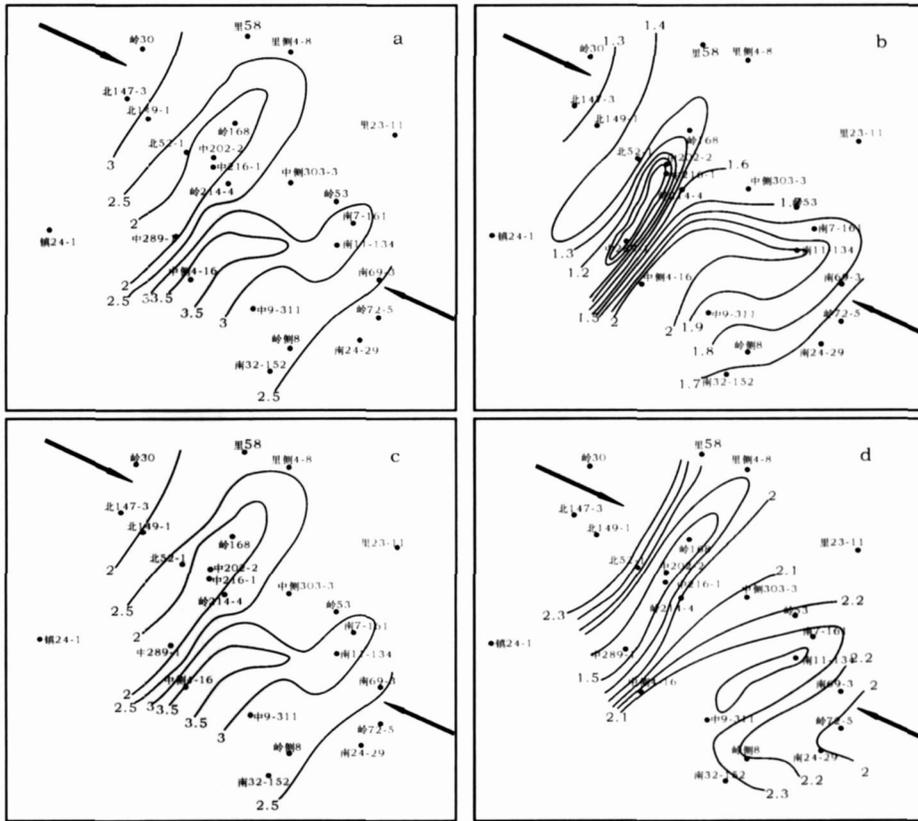


图 3 马岭延 9 油层组原油的咪唑类化合物异构体参数分布

a 1,8-/2,7-二甲咪唑; b 1,8-(2,4+1,5)-二甲咪唑; c PSEs/ENs三甲咪唑比值分布图; d 1-/4-甲基咪唑

Fig 3 Lateral distributions of isomeric ratios of carbazoles in Yan-9 crude oils

比值进行了延 9 油层组的油气运移研究。如图 3 所示, 马岭油田延 9 油层组不同原油样品中咪唑类化合物异构体分布特征, 表现出一定的油气运移分馏效

应。在横向上, 存在 3 个含氮化合物屏蔽化程度高的异构体含量低值区: 从北向南依次为曲子附近的岭 30 井、曲子和马岭中间的中 202-7 井及三十里铺附近

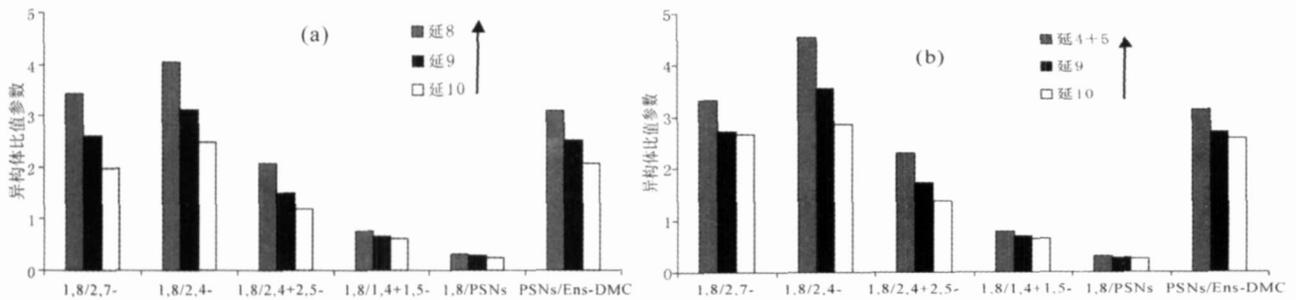


图 4 马岭油田上里源 (a)和南二区 (b)不同层位原油中咔唑类化合物异构体比值分布

Fig 4 Vertical distributions of isomeric ratios of carbazoles in crude oils from different subsection of the Yanan Formation for Shangliyuan (a) and Nanerqu (b) regions

的南 69-3 井。以这些地区为中心, 咔唑类化合物异构体比值从北西向南东和从南东向北西方向增加, 反映了延 9 原油充注点有 3 个, 运移方向主要有两个: 一个是原油从岭 30 井附近地区注入, 并且向南东方向运移, 另一个是原油从南 69-3 井附近地区注入, 向北西方向运移 (图 3); 同时在它们中间的中 202-7 井附近地区还存在一个原油充注点, 分别向北西和南东方向运移, 但是原油运移主要是来自前 2 个充注点。马岭油田延 9 原油的这种运移方向和充注点与下面讨论的油气运移途径是一致的。

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延安组下部烃源岩还是来自延安组烃源岩, 我们也同时分析了延 10、延 8 和延 4+5 油层组原油中咔唑类化合物异构体组成。如图 4 所示, 从延 10 至延 4+5 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^[11]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。这就说明马岭延安组延 9 油层组原油的运移方向, 在纵向上是由下向上; 由于延 10 油层组主要为河道砂岩, 不存在好的烃源岩, 反映了原油从延 10 以下层位向上运移的方向。延 10 下伏地层为延长组, 其长 4—长 7 油层组是有效烃源岩。因此, 油气纵向运移方向反映了延 9 原油来自延长组烃源岩, 这与油源对比研究结果是一致的^[12]。

油气藏中油气运移期次一般通过流体包裹体研究来确定。油气藏储层中广泛存在流体包裹体, 它们是有机质不同演化阶段、油气运移、盆地热流体乃至古油气的最直接样品, 是油气生成、运移和聚集的直接标志。有机包裹体均一化温度一般代表包裹体被捕获时的最低温度, 即烃类运移进入储层时的温度。

其温度的高峰值代表油气二次运移的高峰期。我们对马岭油田延 9 油藏油储层包裹体进行了均一法测温, 发现储层包裹体均一化温度范围在 90~140 °C 之间, 具有两个明显的主要温度范围, 一个为 110 °C, 另一个在 140 °C (图 5), 反映了马岭油田延 9 油藏油气经历了两次运移期和充注期。

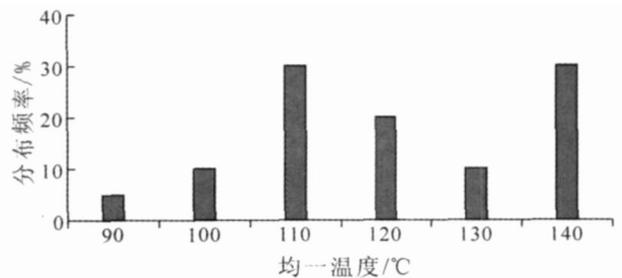


图 5 岭 86 井延 9 储层包裹体均一温度分布

Fig 5 Homogenization temperature of fluid inclusions in the studied reservoir from Well Ling-84

2.2 油气运移通道和运移动力

如上所述, 我们对马岭油田延 9 油藏的研究, 首次发现了 3 个原油充注点。这些充注点与甘陕古河道和庆西古河道密切相关 (图 1b); 并且根据马岭油田延 9 油藏分布可知, 石油运移充注点对油藏分布具有一定的控制作用, 距充注点越近, 油藏分布越多。这说明河道深切谷是所研究油气纵向运移的主要通道。另一方面, 延 9 与延 10 油层组河道砂体的相互纵向叠置直接接触, 或者是延 10 油层组泥岩很薄, 形成油气运移容易穿过的运移窗口, 从而形成延 9 与延 10 油层组之间的油气纵向运移的主要通道。我们对马岭油田延 9 油层组沉积相研究发现, 辫状河在延 9 时期受古水流方向的控制, 河道主要呈 NW—SE 和 NE—SW 两个方向分布, 它们相汇处形成多分支河道

(图 6) 并且延 9 油藏的分布显示了其受多分支河道控制。这说明延 9 油层组原油横向运移为联通的多分支河道。

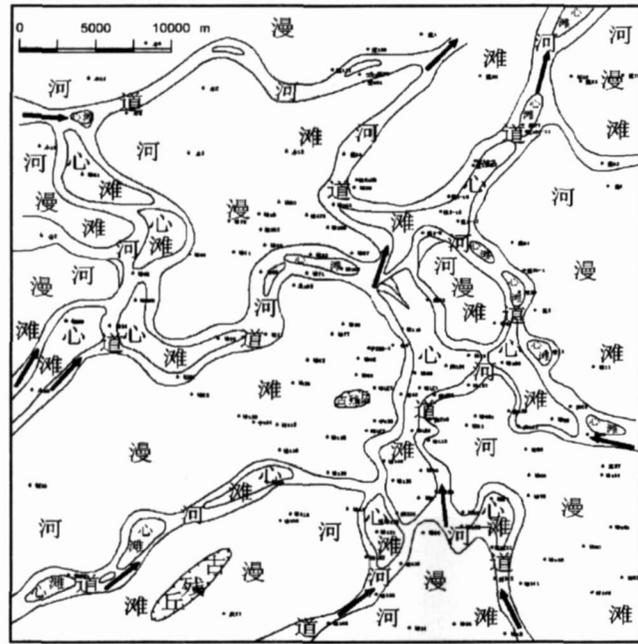


图 6 延 9 油层组沉积相

Fig 6 Fluvial facies of Yan-9 subsection of the Yanan Formation, Maling Oilfield

马岭油田油气运移的纵向动力应该主要为毛细管力和剩余压力。对于长距离运移来说,地层剩余压力对油气运移起着重要的作用。我们应用平衡深度法计算了研究区延长组剩余压力。如图 7 所示,剩余压力从长 4+5 油层组就开始出现,至长 9 油层组均存在。长 7 油层组存在着高剩余压力带,在木 14 井长 7 油层组剩余压力高达 24 MPa 其他油层组剩余压力较低,或者为正常压实带。地下油气总是按照沿阻力最小的途径由相对高剩余压力带向相对低剩余压力带运移的总规律进行。由上述研究区流体压力场特征可知,在纵向上长 7 油层组高剩余压力与浮力一起,推动长 4+5 至长 7 烃源岩,特别是长 7 烃源岩生成的油气,沿古河道切蚀带向上运移,进入延 10 油层组,然后通过延 9 与延 10 油层组河道砂体的相互纵向叠置直接接触部位,或者是延 10 油层组泥岩很薄的油气运移窗口,最后进入延 9 油层组河道砂体聚集成藏。

3 结论

鄂尔多斯盆地马岭油田延 9 油层组为其主力油

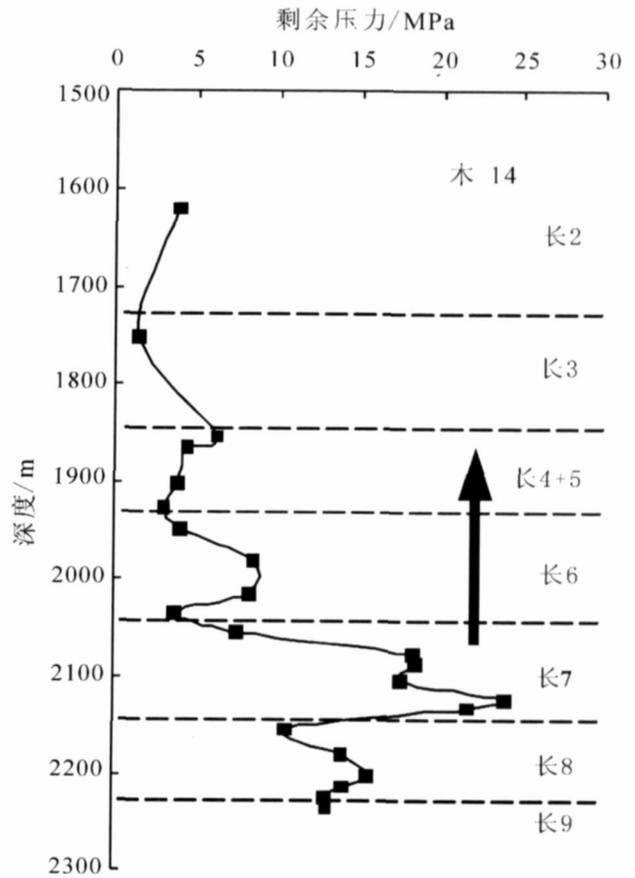


图 7 木 14 井过剩压力剖面及油气运移方向

Fig 7 Distribution of abnormal pressure and migration direction for Well Mu-14

层之一,对该油层组油藏形成的油气运移研究还未见报道过。我们的研究发现,延 9 油层组原油含有丰富的含氮化合物,它们主要由咪唑、C₁ ~ C₃ 咪唑和苯并咪唑系列所组成;所研究样品中咪唑类化合物组成特征都十分相似,可能反映了它们具有相同的油源。

马岭油田延 9 油层组不同原油样品中咪唑类化合物异构体分布特征,表现出一定的油气运移分馏效应。在横向上,存在 3 个含氮化合物屏蔽化程度高的异构体含量低值区,以这些地区为中心,咪唑类化合物异构体比值从北西向南东和从南东向北西方向增加,反映了延 9 油层组原油充注点有 3 个,运移方向主要是向南东方向和向北西方向运移。纵向上从延 10 至延 6 油层组,原油中咪唑类化合物异构体比值增加,反映了原油纵向运移方向是由下向上;由于延 10 主要为河道砂岩,不存在好的烃源岩,说明原油从延 10 以下层位向上运移的方向,即原油来自延长组烃源岩。油藏储层包裹体均一化温度分布特征指示

了油气经历了两次运移期和充注期。

研究结果显示,马岭油田延9油层组原油运移通道在纵向上主要是河道深切谷和延9与延10油层组河道砂体的相互纵向叠置直接接触部位,或者是延10油层组泥岩很薄处形成的油气运移窗口;横向上为联通的多分支河道。油气运移的纵向动力主要为毛细管力和剩余压力。

参考文献 (References)

- 1 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 60-85 [Yang Junjie. Tectonic Evolution and Petroleum Distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 60-85]
- 2 Li M W, Yao H X, Stasiuk L D et al. Effect of maturity and petroleum expulsion on pyrrolic nitrogen compound yields and distribution in Duvernay formation petroleum source rocks in central Alberta, Canada [J]. *Organic Geochemistry* 1997, 26: 731-744
- 3 李素梅, 张爱云, 王铁冠. 原油中吡咯类含氮化合物的分布型式 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 118-122 [Li Sumei, Zhang Aiyun, Wang Tieguan. Distribution pattern of pyrrolic nitrogen compound in crude oil [J]. *Oil & Gas Geology* 2000, 21(2): 118-122]
- 4 熊英, 程克明. 中性含氮化合物在酒西盆地石油运移研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 27-29 [Xiong Ying, Cheng Keming. Application of neutral pyrrolic N compounds in the study on petroleum migration in Jiuxi Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development* 1999, 26(5): 27-29]
- 5 黎茂稳. 油气二次运移研究的基本思路和几个应用实例 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 11-19 [Li Maowen. Quantification of petroleum secondary migration distances: fundamentals and case histories [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2000, 27(4): 11-19]
- 6 李素梅, 刘洛夫, 王铁冠. 生物标志化合物和含氮化合物作为油气运移指标有效性的对比研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 95-98 [Li Sumei, Liu Luofu, Wang Tieguan. A comparison study on the effectiveness of using biomarker and nitrogenous compound as indexes indicating oil and gas migration [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2000, 27(4): 95-98]
- 7 李伟, 刘宝瑞, 吕涛, 等. 酒西盆地老君庙构造带油气来源的探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 30-32 [Li Wei, Liu Baorui, Lv Tao et al. Oil and gas sources of Laojunmiao structural belt in Jiuxi Basin, Northwest China [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(2): 30-32]
- 8 李素梅, 庞雄奇, 黎茂稳, 等. 低熟油、烃源岩中含氮化合物分布规律及其地球化学意义 [J]. 地球化学, 2002, 31(1): 1-6 [Li Sumei, Pang Xiongqi, Li Maowen et al. Characteristics of pyrrolic nitrogen compounds and their geochemical significance in oils and rocks of Banianhe oilfield, Eastern China [J]. *Geochimica* 2002, 31(1): 1-6]
- 9 段毅, 郑朝阳, 吴保祥, 等. 马岭油田及其周边地区滚动扩边潜力研究 [C] // 兰州: 中国科学院兰州地质研究所, 2006 [Duan Yi, Zheng Chaoyang, Wu Baoxiang et al. Research on progressive enlarging potential of Maling Oilfield and around [C] // Lanzhou: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 2006]
- 10 段毅, 张辉, 吴保祥, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油含氮化合物分布特征与油气运移 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 17-20 [Duan Yi, Zhang Hui, Wu Baoxiang et al. Distribution of nitrogen compounds and migration of the oils in the Xifeng Oilfield, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2004, 31(5): 17-20]
- 11 Darban M, Schmitter JM, Garrigues P et al. Distribution of carbazole derivatives in petroleum [J]. *Organic Geochemistry* 1984, 7: 111-120
- 12 Bowler B F, Larter S R, Clegg H et al. Dimethylcabazoles in crude oils: comment on "liquid chromatographic separation schemes for pyrrole and pyridine nitrogen aromatic heterocycle fractions from crude oils suitable for rapid characterization of geochemical sample" [J]. *Analytical Chemistry* 1997, 69: 3128-3129

Study on the Migration of Crude Oil in Yan-9 Subsection of the Yanan Formation, Maling Oilfield in Ordos Basin, China

DUAN Yi WU Bao-xiang ZHENG Chao-yang SUN Tao WANG Jian-gong

(Oil and Gas Resource Research Center of Lanzhou Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract The charging and migration direction as well as migration time, pathway and power of crude oil in Yan-9 subsection of the Yanan Formation of Maling oilfield in Ordos Basin have been studied for the first time. The migration fractionation of neutral nitrogen compounds in the crude oils indicate that the lateral charging direction of crude oil is from the southeast of the oilfield to the northwest and from the northwest of the oilfield to the southeast. It is also observed by means of the migration fractionation features of neutral nitrogen compounds in the oils that vertical migration direction of crude oil is upward. The homogenization temperature of fluid inclusions in the reservoir exhibits two peak temperatures, reflecting the two stages of migration and accumulation of oil. The migration pathway of oil is river sandstones. The migration power of oil is capillary strength and abnormally high pressure.

Key words Ordos Basin, Maling oilfield, geochemistry, oil migration