

三塘湖盆地马朗凹陷二叠系油气运移机制与页岩油富集规律

柳波^{1,2}, 迟亚奥¹, 黄志龙², 罗权生³, 吴红烛², 陈旋³, 申英³

(1. 东北石油大学 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油 吐哈油田分公司, 新疆 哈密 839009)

摘要:三塘湖盆地马朗凹陷发现的二叠系芦草沟组页岩油, 具有较好的油气资源潜力, 其形成与富集机理与常规油气藏有很大差异。页岩油运移机制是页岩油形成机理的重要部分, 在岩心观察、薄片鉴定结合地球化学分析化验及地质条件综合分析的基础上, 重点研究了页岩油运移的动力、通道、方向、距离和效率等方面。结果表明, 页岩油在源内的运移效应不明显, 油气的富集非源内规模性运移聚集结果; 油气垂向向源外的运移效应较为显著, 活动的大规模断裂会降低源内页岩油丰度。页岩油的初次运移以生烃造成的地层超压为动力, 通过干酪根网络、纹层间及微裂缝发生了小尺度的运移, 油气大部分滞留原地, 运移效率极低。在输导断裂发育的地区, 泥页岩生成的油气发生了垂向向上的二次运移, 在芦草沟组上覆地层聚集成藏。页岩油的这种运移机制决定了页岩油连续分布、油水分离差、油气聚集不受构造控制及断裂活动区油气丰度较低的特点。

关键词:运移效应; 运移通道; 页岩油; 二叠系; 马朗凹陷; 三塘湖盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Migration mechanism of the Permian hydrocarbon and shale oil accumulation in Malang Sag, the Santanghu Basin

Liu Bo^{1,2}, Chi Yaao¹, Huang Zhilong², Luo Quansheng³, Wu Hongzhu², Chen Xuan³, Shen Ying³

(1. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. PetroChina Turpan-Hami Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Hami, Xinjiang 839009, China)

Abstract: The shale oil potential is high in the Permian Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin. Its genetic mechanism and accumulation patterns are greatly different from those of conventional reservoirs. Migration is a major component of genetic mechanism of shale oil. Based on core and thin section observation, and in combination with geochemical data and geological condition analysis, this paper studied the migration mechanism of shale oil, including dynamic force, pathway, direction, distance, efficiency and so on. Migration effect of shale oil within source rocks is insignificant, thus shale oil reservoirs are not the result of oil migration and accumulation within source rocks. In contrast, vertical migration effect of shale oil out of source rocks is significant. The existence of large active faults may lower the abundance of shale oil in source rock. High formation pressure caused by hydrocarbon generation is the main dynamic force of primary migration. After small scale migration through kerogen network, interlamination and microfractures, most of the oil generated retain in place, and the migration efficiency is very low. On the contrary, in areas where carrier faults are well developed, the oil can migrate vertically along the faults and accumulate in the overlying reservoirs of the Lucaogou Formation. This migration mechanism of shale oil determines the characteristics of shale oil play such as continuous distribution, no obvious oil-water contact, no influence of structure on oil accumulation, and low abundance of oil in areas with active faults.

Key words: migration effect, migration pathway, shale oil, Permian, Malang Sag, Santanghu Basin

页岩油气是一类极为重要的非常规油气资源, 页岩气是烃源岩中未运移出去的以吸附、游离或水溶方

式存在的连续烃类聚集, 当烃源岩处于生油窗时, 页岩中赋存的烃类为液态, 称为“页岩油”。目前已有大量

收稿日期: 2012-10-30; 修订日期: 2013-09-20。

第一作者简介: 柳波(1983—), 男, 博士、副教授, 油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail: Liubo6869@163.com。

基金项目: 国家青年自然科学基金项目(41202101); 国土资源部全国油气资源战略选区调查与评价专项(2009GYXQ15); 中国博士后科学基金面上资助项目(2013M541338)。

的研究探讨页岩气的富集规律,正在逐步认识其展布特征及资源潜力,但页岩油的相关研究还很薄弱,关于其在页岩层内是否经历了规模性运移而形成相对富集区还存在较大的争议;普遍认识到断裂活动会减少源内油气富集丰度,却缺少相关证据,即页岩油的运移机制还需要深入研究^[1-2]。页岩油的运移机制是页岩油原地滞留、连续分布的重要成因,其研究主要包括运移的相态、动力、阻力、通道、方向、距离、时期和效率等基本特征^[3-4]。本文通过地球化学分析、源岩内流体压力特征及烃源岩展布与输导断裂分布关系,结合岩心和岩石薄片观察,分析了页岩油的运移特征,探讨了不同于常规油气的运移机制。

1 芦草沟组页岩油勘探现状

在区域大地构造位置上,三塘湖盆地位于西伯利亚板块南缘,在地史时期整体属于大陆边缘活动带。现今残留的二叠系芦草沟组分布于马朗—条湖凹陷的西南部,东北部地层在印支运动时遭受剥蚀。原始陆源输入较少,地层岩性主要由形成于沉积水体能量较低的碳酸盐岩和暗色泥岩组成,基质孔隙发育程度较差,有机质含量高,是盆地中浅层成藏体系的主力烃源岩层。

二叠系芦草沟组的油气勘探始于20世纪90年代末。勘探的十年间相继在马朗凹陷发现了牛圈湖构造带、马中构造带及黑墩构造带等二叠系芦草沟组油藏(图1)。产油层段岩性以泥质云岩、云质泥岩为主,储层致密并同时具备生烃潜力,如L6井试油段3265~3298 m岩性以云质泥岩为主,TOC(有机碳含量)为1.57%~5.86%,日产油22.2 m³。受当时勘探认识和

开发技术的限制,在2002年以后该层系难以获得突破。随着近年来非常规油气勘探理论的发展,2010年在马中构造带东北部钻探的水平井于芦草沟组烃源岩发育层段压裂后,油水同出,获得日产油3 m³的低产稳产效果,油水界面不清晰,确认为页岩油^[5-7]。

芦草沟组岩性复杂,湖相碳酸盐岩沉积受气候影响比较大,往往形成各种细粒岩薄互层的结构。有机质含量高的泥质岩类与储集空间较为发育的碳酸盐岩类构成纹层结构,随着热演化的进行,烃源岩层首先生成大量的酸性流体改造附近的岩石,形成次生溶蚀孔隙,当源岩进入生油窗时,生成的烃类粘度较大,无需(也不可能)长距离的运移,便可在这些有效储集空间中聚集。

芦草沟组生成的原油相比石炭系烃源岩生成的原油具有较低的成熟度,其原油密度较大,普遍大于0.86 g/cm³(检测温度为20℃),粘度较大,大于50 mPa·s(检测温度为50℃),且原油密度与粘度呈正相关关系。其饱芳比为1.95~2.96(均小于4),平均2.46;非沥比变化范围广,为7.03~89.19(均大于5),平均38.02,这种低饱芳比和高非沥比是芦草沟组原油在族组成上区别于成熟原油的另一特征。因此,芦草沟组生成的原油物性与族组成上可明显区分于另外一套石炭系烃源岩生成的原油,这两套烃源岩生成的原油生物标志物也具有明显的区分特征^[8],这为页岩油运移机制的研究提供了方便。

2 页岩油运移效应

油气的运移会造成原油族组成和生物标志物特征发生变化,即油气的运移效应^[9]。

2.1 原油族组成运移效应

对比各构造带不同层位芦草沟组生成原油族组成特征可知(图2),在同一构造带内,由于垂向运移效应,源内芦草沟组(P₂l)原油较源外二叠系条湖组(P₂t)和侏罗系西山窑组(J₂x)原油具有饱和烃含量低、“非烃+沥青质”含量高的族组成特征。

芦草沟组整体埋深从马北构造带、牛圈湖构造带、马中构造带至黑墩构造带依次增大,使得源内原油饱和烃含量依次变高、非烃+沥青质质量逐渐变低,这种现象是由不同地区烃源岩成熟度差异造成的,与各构造带烃源岩演化程度分析结果一致^[8]。

2.2 原油生物标志化合物运移效应

芦草沟组源岩层内原油与其附近的源岩可溶有机质各生标参数仅有微小的差别,而与浅层地层中芦草

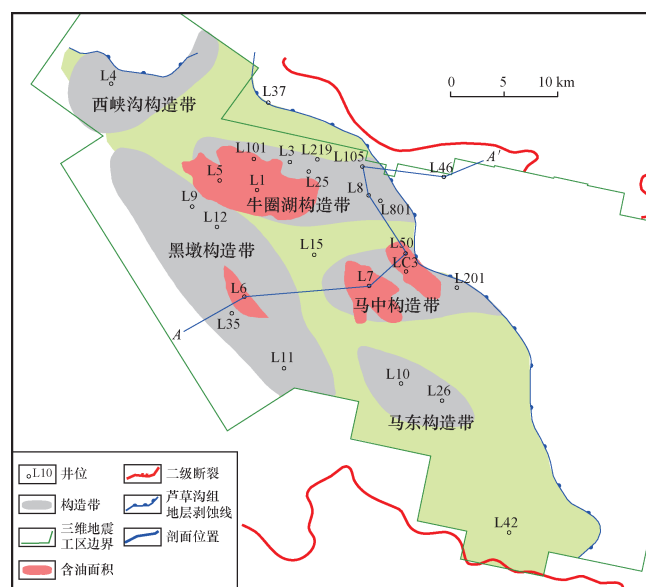


图1 马朗凹陷二叠系芦草沟组勘探成果

Fig. 1 Exploration results of the Permian Lucaogou Formation in the Malang Sag

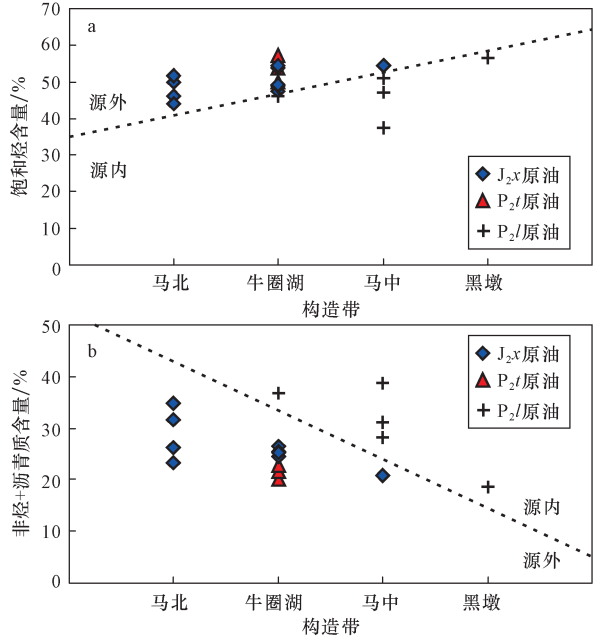


图 2 马朗凹陷各构造带不同层位芦草沟组生源油饱和烃含量、非烃 + 沥青质含量对比
Fig. 2 Comparison of saturated hydrocarbon content with nonhydrocarbon + asphaltene content in oil generated from different intervals of the Lucaogou Formation in each structural belt in the Malang Sag

沟组烃源岩所生的原油相差较大(图 3,图 4),同样反映了页岩油在页岩层内部的运移效应不明显,向源外的运移效应明显。

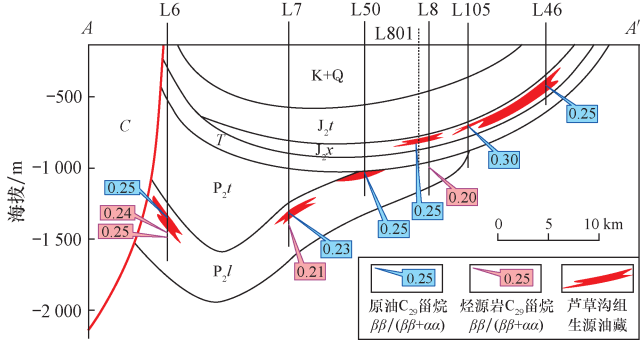
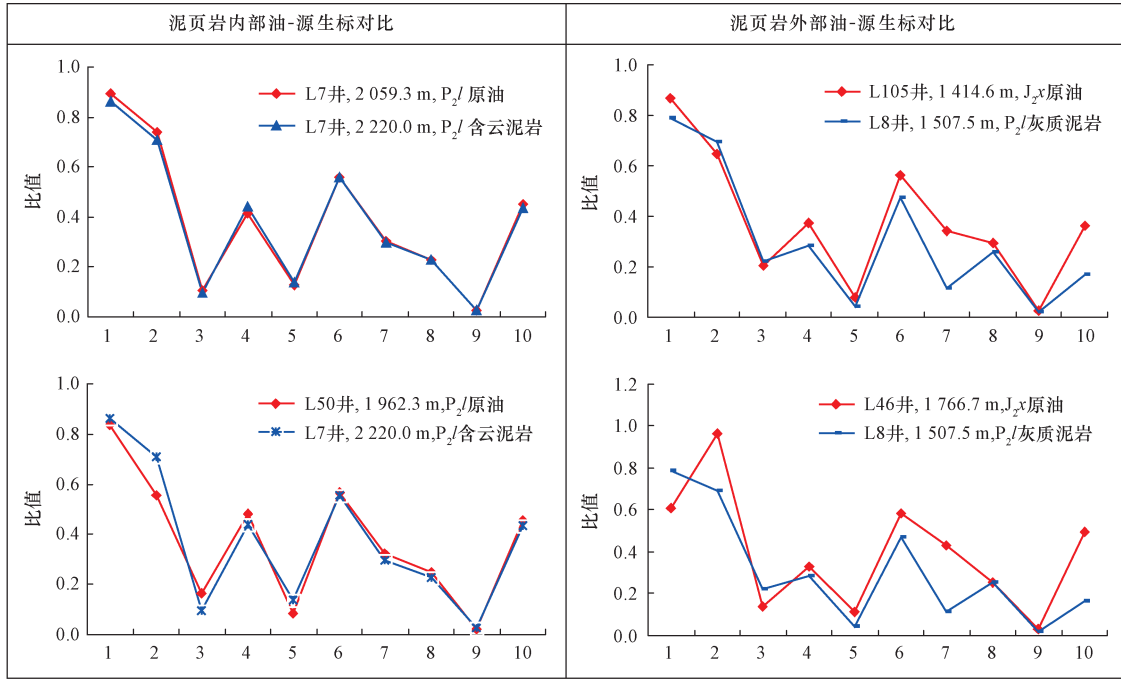


图 3 马朗凹陷 P_2l 生源油与邻近 P_2l 烃源岩生物标志物参数对比剖面示意图(剖面位置见图 1)
Fig. 3 Comparison of biomarkers between oil sourced from P_2l and the adjacent source rock of P_2l in the Malang Sag

3 页岩油初次运移机制

油气的初次运移是指烃源岩在进入生烃门限后,生成的烃类在某种动力驱动下从源岩排出的过程^[10]。目前已有大量的研究证实芦草沟组油气来自芦草沟组烃源岩,为自生自储型短距离聚集,初次运移具有重要意义^[11]。

根据烃源岩有机质抽提前后 TOC 对比,可以排除次生运移的烃类对热解参数评价烃源岩的影响。从热解数据对比分析发现(表 1),泥岩、泥灰岩、灰质泥岩等岩性抽提前后 TOC 变化较小,用热解参数评价烃源



1. Pr/Ph ; 2. C_{21}/C_{22+} ; 3. $Ts/(Ts+Tm)$; 4. γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷; 5. 三环藿烷/五环藿烷; 6. C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$; 7. C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$; 8. C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$; 9. 重排甾烷/规则甾烷; 10. 甾烷/藿烷

图 4 马朗凹陷 P_2l 生源油与邻近 P_2l 烃源岩生标多因素对比
Fig. 4 Comparison of multiple biomarkers between oil sourced from P_2l and the adjacent source rock of P_2l in the Malang Sag

表1 马朗凹陷不同岩性烃源岩抽提前、后有机碳含量对比
Table 1 TOC comparison of different source rocks from the Malang Sag before and after extraction

岩性	抽提前 TOC/%	抽提后 TOC/%	降低幅度/%
泥岩	4.235	4.189	1.086
含灰泥岩	10.333	9.693	6.199
灰质泥岩	7.878	7.081	10.117
泥质灰岩	3.501	3.117	10.968
泥晶灰岩	1.283	1.191	7.188
含泥云岩	3.860	1.501	61.114
泥晶云岩	1.741	0.820	52.886
凝灰岩	4.688	4.017	14.315
含粉砂泥岩	1.076	1.007	6.409

岩可以真实反映其质量好坏。只有含泥云岩和泥晶云岩有机质抽提前后 TOC 值变化较大,样品抽提后 TOC 值明显低于抽提前 TOC 值,降低幅度为 38.886% ~ 47.114%,并且 TOC 均小于 2%,抽提前较高的 TOC 值为岩石内运移烃类影响。此外,岩心观察也明显的见到灰质泥岩生成的烃类向泥质云岩运移(图 5),可见云岩类作为源岩较差,存在页岩油的初次运移。

生成的烃类排出烃源岩的微观过程分析手段有限,结合本区的岩性特点,可以将油气初次运移通道划分为孔隙喉道、微裂缝及干酪根网络^[12-13],其中,微裂缝及干酪根网络的组合形式是主要的初次运移通道。

根据前人对芦草沟组烃源岩演化分析可知,烃源岩大量生烃时期为白垩纪末,大部分地区源岩进入主生烃区,对应的 R_o (镜质体反射率) 为 0.55% ~ 0.75%,这个阶段烃源岩的脱水作用已经处于平稳降低时期,难以形成使油气运移的水动力条件。此外,处于低熟-成熟早期阶段的烃源岩由水凝胶转变为沥青凝胶,形成均一的“沥青相”,为源内运移提供了条件^[14],而此阶段生成的油气密度大、粘度高,向源外运移阻力大,初次运移门槛高。

实测压力系数表明本区目的层正处于源内异常高压发育段,油气通过“干酪根网络”在源岩层中运

移,由生烃作用产生的异常高地层压力可能是油气初次运移最重要的动力。生成的油气在达到干酪根吸附量最大值、充满刚性颗粒间孔隙后,顺着纹层缝、微裂缝发生了初次运移。但由于烃源岩尚处于低熟阶段,实测压力系数最大不超过 1.4,且烃源岩连片分布范围广,加之传统意义的碎屑岩储层不发育,排烃裂缝未突破岩层,未发生大量排烃,初次运移规模较小。由此可见,随着生烃作用增加的地层压力尚未能使裂缝开启,与之相对应的幕式排烃不明显^[15],异常高的地层压力也正是源岩内存在滞留油的证据。

实际上,不单是初次运移动力不足,本区烃源岩岩性复杂,源岩的非均质性对油气的初次运移也十分不利^[16]。当运移中的油气遇到孔隙结构变化频繁时,会受到较强的毛管压力而滞留成页岩油,赋存在纹层面及水平层理间。这种初次运移的机制促使了本区页岩油的形成。

4 页岩油二次运移机制

芦草沟组烃源岩及其生成的原油生物标志化合物特征对比表明^[17],芦草沟组页岩油在牛圈湖构造带、西峡沟构造带及马中构造带均发生了垂向上的二次运移,浅部地层也有该类原油分布。根据二叠系以上地层油气显示厚度统计可见(图 6),油气显示丰富的地区均为下伏芦草沟组烃源岩质量较好,且处于生烃高峰,并有长期活动的大断裂连通上下地层。这类输导断裂多为逆断层,上陡下缓,断穿石炭系至侏罗系,最终断至白垩系,断开层位较多。断距下大上小,即老地层断距大,向上新地层断距逐渐减小,表明这些强输导断裂具有多期次继承性活动特点,为芦草沟组生成的油气垂向运移提供了良好的通道。岩心观察结果也同样表明,断面含油级别较高,是油气沿断裂发生运移的重要证据(图 7)。

二次运移对页岩油的形成不利,势必会降低泥页

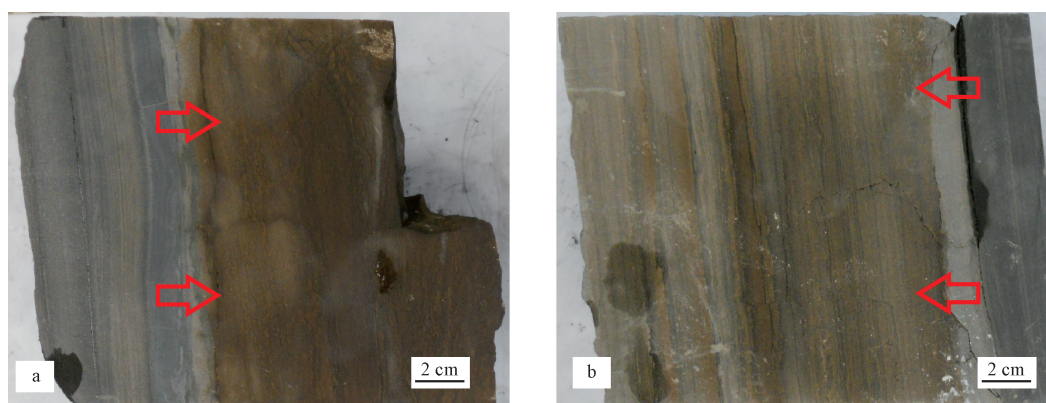


图5 马朗凹陷页岩油岩心初次运移特征

Fig. 5 Characteristics of primary migration of shale oil in cores sampled from the Malang Sag

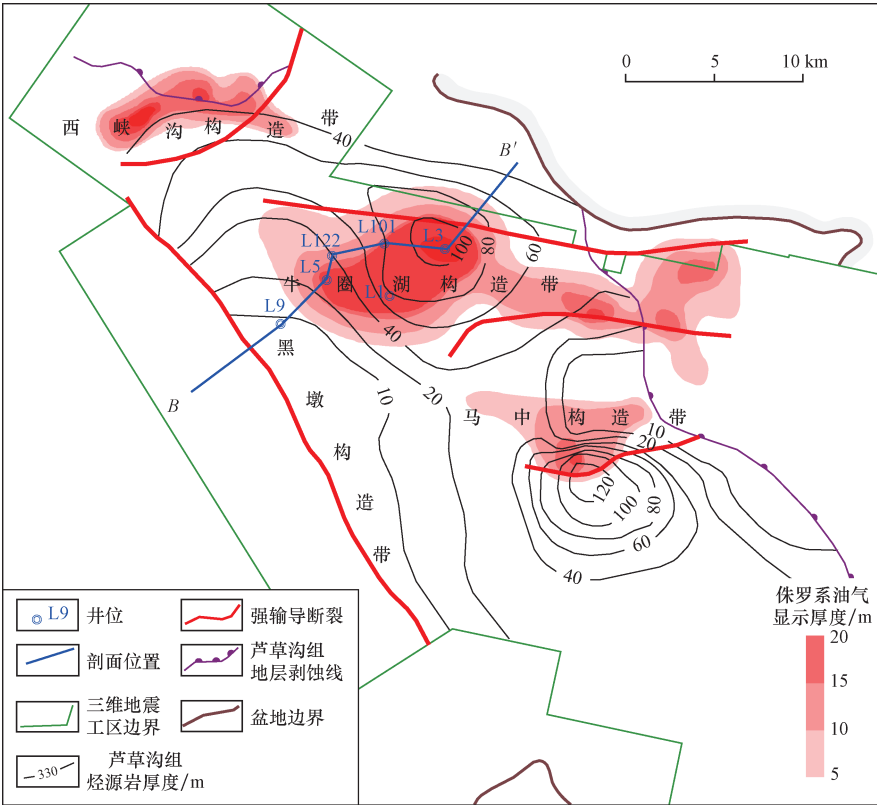


图 6 马朗凹陷输导断裂与烃源岩厚度平面分布

Fig. 6 Distribution of source rock thickness and carrier faults in the Malang Sag

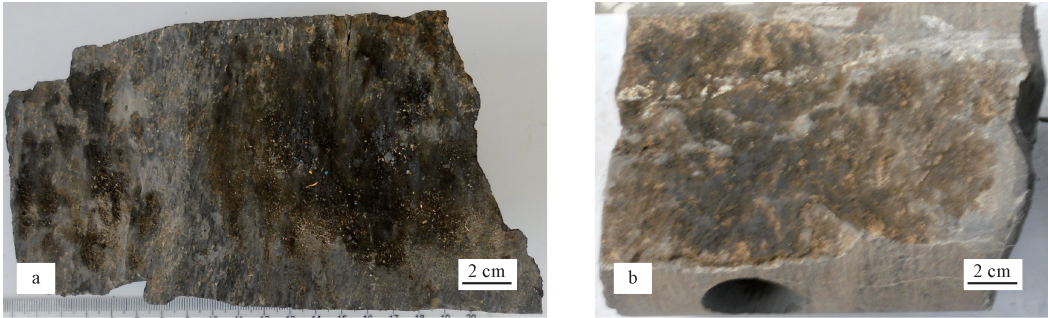


图 7 马朗凹陷芦草沟组泥质灰岩岩心断裂含油特征

Fig. 7 Oil-bearing characteristics of fractures in argillaceous limestone cores of the Lucaogou Formation in the Malang Sag

岩内油气丰度。实际的勘探结果也证明了这一点,在距离牛圈湖构造带北断裂较近的芦草沟组生成的原油通过输导断裂向上运移,页岩油保存条件较差,如 L3 井和 L101 井距离该断裂的平面垂直距离为 1.6 km,导致这两口井油气显示丰富却无工业油流,电阻率曲线表现为低值平直形;而距离大断裂较远的 L1 井、L122 井、L5 井和 L9 井均获得了工业油流,并且电阻率曲线表现为高值弧形,反映了芦草沟组二段与上、下地层之间孔隙连通性差,地层中段电阻率值比顶底两段值大许多,是地层富含油的表现(图 8)。

综上所述,沟通芦草沟组的断裂,是烃源岩生成的油气向外排运通道,使油气在二叠系条湖组、浅层侏罗系聚集成油气藏。上二叠统芦草沟组泥质烃源岩在

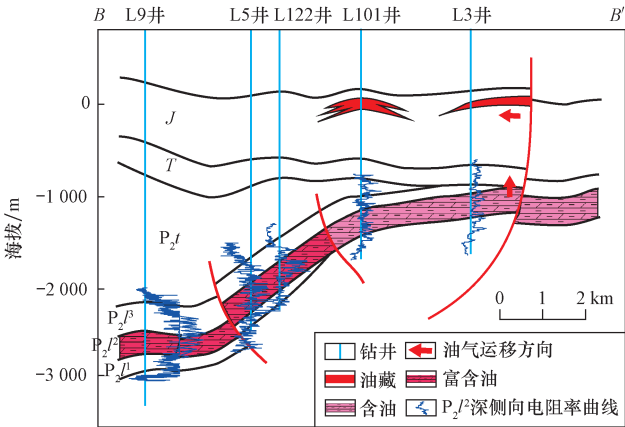


图 8 马朗凹陷连井电阻率横向剖面(剖面位置见图 6)

Fig. 8 Resistivity profile of multiple wells in the Malang Sag

晚侏罗世开始大量成烃, 芦草沟组上覆地层以断层、裂缝与连通性地层为运移通道, 具有早白垩世末期和晚白垩世末期两次成藏关键时期。在断裂带附近的上覆岩层发现芦草沟组生成的石油聚集, 说明由于断裂作用以及与之相伴生的裂缝, 可以导致烃源岩生成的石油向外排运, 对页岩油保存条件不利。除此之外的大部分地区, 芦草沟组烃源岩无向外大量排烃的明显证据。这说明芦草沟组油气以源内聚集为主, 有利于页岩油的富集。

5 结论

1) 油气运移效应表明, 芦草沟组页岩油初次运移不明显, 油气通过断裂的垂向向外的二次运移明显。这种运移机制使页岩油具有连续分布、油水分异差、油气聚集不受构造控制的特点。

2) 芦草沟组页岩油的初次运移是以生烃造成的较高的异常压力为动力, 较强的毛管压力为阻力, 微裂缝及干酪根网络为主要运移通道, 初次运移效率较低。

3) 芦草沟组生源油的二次运移是在烃源岩厚度较大、处于生油窗, 并发育有输导断裂的前提下发生的, 不利于源内页岩油的富集。

参 考 文 献

- [1] Rodriguez N D, Paul Philp R. Geochemical characterization of gases from the Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94 (11): 1641 - 1656.
- [2] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37 (2): 129 - 144.
- Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (2): 129 - 144.
- [3] 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- Li Mingcheng. Oil and gas migration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [4] 李明诚. 石油和天然气运移、聚集的特征 [J]. 地球物理学进展, 1994, 9 (1): 120 - 124.
- Li Mingcheng. Oil and gas migration, accumulation characteristics [J]. Progress in Geophysics, 1994, 9 (1): 120 - 124.
- [5] 梁世君, 黄志龙, 柳波, 等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集规律 [J]. 石油学报, 2012, 33 (4): 588 - 594.
- Liang Shijun, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (4): 588 - 594.
- [6] 黄志龙, 郭小波, 柳波, 等. 马朗凹陷芦草沟组源岩油储集空间特征及其成因 [J]. 沉积学报, 2012, 30 (6): 1115 - 1122.
- Huang Zhilong, Guo Xiaobo, Liu Bo, et al. The reservoir space characteristics and origins of Lucaogou Formation source rock oil in the Malang Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30 (6): 1115 - 1122.
- [7] 柳波, 吕延防, 赵荣, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统地质超压与页岩油富集机理 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39 (6): 699 - 705.
- Liu Bo, Lü Yanfang, Zhao Rong, et al. Formation overpressure and shale oil enrichment in the shale system of Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (6): 699 - 705.
- [8] 苏传国, 王志勇, 金颖, 等. 三塘湖盆地原油成因类型及油源分析 [J]. 吐哈油气, 2004, 4 (5): 1 - 5.
- Su Chuanguo, Wang Zhiyong, Jin Ying, et al. Santanghu Basin genetic types of crude oil and oil-source analysis [J]. Tuha Oil and Gas, 2004, 4 (5): 1 - 5.
- [9] 田世澄, 孙尚如. 油气初次运移的地球化学效应及排烃类型 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1990, 15 (1): 75 - 86.
- Tian Shicheng, Sun Shangru. Primary migration of oil and gas geochemical effect and hydrocarbon expulsion type [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1990, 15 (1): 75 - 86.
- [10] 黄福喜, 陈洪德, 王茂显, 等. 新疆马朗凹陷油气二次运移模式及其勘探意义 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2009, 36 (4): 379 - 386.
- Huang Fuxi, Chen Hongde, Wang Maoxian. Xinjiang Malang depression secondary migration patterns of oil and gas exploration significance [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 36 (4): 379 - 386.
- [11] 张枝焕, 关强. 新疆三塘湖盆地二叠系油源分析 [J]. 石油实验地质, 1998, 20 (2): 174 - 181.
- Zhang Zhihuan, Guan Qiang. Xinjiang Santanghu Permian Basin oil source analysis [J]. Petroleum Experiment Geology, 1998, 20 (2): 174 - 181.
- [12] 罗晓容. 油气初次运移的动力学背景与条件 [J]. 石油学报, 2001, 22 (6): 24 - 29.
- Luo Xiaorong. Primary migration of oil and gas dynamic background and conditions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22 (6): 24 - 29.
- [13] 王新洲, 周迪贤, 王学军. 流体间歇压裂运移——石油初次运移的重要方式之一 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21 (1): 20 - 26.
- Wang Xinzhou, Zhou Dixian, Wang Xuejun. Intermittent fracturing fluid migration—primary migration of oil is one important way [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21 (1): 20 - 26.
- [14] 张卫彪, 钟宁宁, 任德贻. 三塘湖盆地侏罗系煤成油初次运移 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (6): 623 - 627.
- Zhang Weibiao, Zhong Ningning, Ren Deyi. Santanghu Jurassic coal-oil primary migration [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29 (6): 623 - 627.
- [15] 康德江. 碎屑岩中油气初次运移输导体系分类及特征 [J]. 石油实验地质, 2009, 31 (5): 455 - 461.
- Kang Dejiang. Clastic rocks in the primary migration of oil and gas transporting system classification and characteristics [J]. Petroleum Experiment Geology, 2009, 31 (5): 455 - 461.
- [16] 李传亮, 张景廉, 杜志敏. 油气初次运移理论新探 [J]. 地学前缘, 2007, 14 (4): 132 - 141.
- Li Chuanliang, Zhang Jinglian, Du Zhimin. New theory of primary migration of oil and gas exploration [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (4): 132 - 141.
- [17] 张枝焕, 关强. 新疆三塘湖盆地侏罗系油源分析 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1998, 22 (5): 37 - 41.
- Zhang Zhihuan, Guan Qiang. Xinjiang Santanghu Jurassic oil-source analysis [J]. China University of Petroleum (Natural Science Edition), 1998, 22 (5): 37 - 41.

(编辑 董立)