

文章编号: 1001-6112(2011)04-0419-05

准噶尔盆地车排子凸起轻质油母源及充注方向

李 政^{1,2}, 张林晔², 沈忠民¹, 郭春清²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 中国石化 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要:车排子凸起新近系沙湾组轻质油藏的发现是该区油气勘探史上的一个重大突破。通过稳定碳同位素及生物标志物等地球化学指标的分析,认为该原油并非侏罗系与其它层系烃源岩的混源,而是侏罗系烃源岩生成的单源原油。通过侏罗系烃源岩生排烃史、车排子凸起构造发育史以及与独山子原油地化特征的分析与对比,认为该轻质油来自车排子凸起南部的四棵树凹陷东南端及北天山山前断褶带,该区侏罗系烃源岩生成的原油经深部断裂垂向运移至新近系沙湾组地层后,再沿车排子凸起的南倾斜面经沙湾组厚砂层向北或北偏西方向侧向运移至车排子地区,并在合适的圈闭聚集成藏。

关键词:轻质油;油源对比;充注方向;侏罗系;车排子凸起;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.1⁺14

文献标识码:A

Source and migrating direction of light oil in Chepaizi Uplift, Junggar Basin

Li Zheng^{1,2}, Zhang Linye², Shen Zhongmin¹, Guo Chunqing²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Geological Scientific Research Institute, Shengli Oil Field Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The discovery of light oil reservoir of Neogene Shawan Formation is a great breakthrough in petroleum exploration history of the Chepaizi Uplift, the Junggar Basin. Studies of geochemical parameters such as stable isotope and biological markers have indicated that the crude oils in the region come from Jurassic hydrocarbon source rocks. Geochemical features of the Dushanzi crude oil are compared with histories of hydrocarbon generation and migration of the Jurassic source rock and tectonic evolution of the Chepaizi Uplift, proving that the light oils mainly come from the Sikeshu Sag and the faulted fold zones of the Northern Tianshan Mountain. The crude oils which sourced from Jurassic migrate vertically through deep fractures into the Neogene Shawan Formation, and then move northward or northwestward along the southern slope of Chepaizi Uplift to the Chepaizi region, and finally accumulate in proper traps.

Key words: light oil; oil and source rock correlation; migrating direction; Jurassic; Chepaizi Uplift; Junggar Basin

车排子凸起是准噶尔盆地西部的一个次级构造单元,其西北为扎伊尔山,东部和南部分别与昌吉凹陷和四棵树凹陷相接,面积约 10 800 km² (图 1)。车排子凸起的油气勘探始于 20 世纪 50 年代,分别于 60 年代建成红山嘴油田、80 年代建成车排子油田、90 年代建成小拐油田,且与准噶尔盆地西北缘多数油藏一样遭受破坏^[1],采出原油皆为稠油,开采难度大、成本高。然而,自 2005 年以来,却陆续在该地区的排 2、排 206、排 8 等井的新近系沙湾组(N_{1s})发现了轻质油藏。该类原油在 20 °C 下密度为 0.79 g/cm³,粘度为 2.78 mm²/s,酸值为零,凝固点只有 2.0 °C(一般原油凝固点都在 10 °C

以上),绝大部分理化指标相当于-10 号到-20 号柴油,部分指标甚至达到 90 号汽油标准,是炼制高品质航空燃油的绝佳原料,具有极高的开采价值。车排子凸起高品质轻质油的发现,突破了在该区只能找稠油的禁锢,为同类地区寻找优质油藏提供了很好的借鉴。但由于该区紧邻多个生油凹陷,且长期处于油气的有利指向区,导致了油气来源的复杂性和多解性,严重制约了后期勘探的顺利进行。本文正是在此背景下,主要从地球化学角度,同时结合构造及运移通道研究,分析了车排子凸起轻质油母源及充注方向问题,以期对该区类似优质油藏的勘探提供可靠的科学依据。

收稿日期:2011-02-14;修订日期:2011-06-27。

作者简介:李政(1975-),男,高级工程师,从事油气地球化学研究工作。E-mail:lizheng151512@163.com。

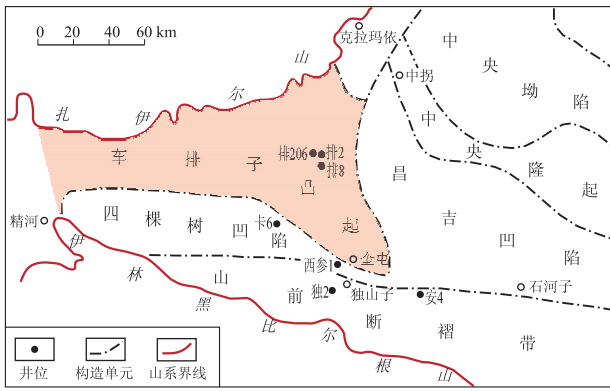


图 1 准噶尔盆地车排子凸起构造位置

Fig. 1 Tectonic location of Chepaizi Uplift, Junggar Basin

1 轻质油地化特征及母源分析

1.1 轻质油有机地球化学特征

本区轻质油族组成中以饱和烃为主,含量接近或超过 80%;其次为芳烃和非烃,含量分别约为 15%和 5%;不含沥青质。原油的稳定碳同位素重,全油 $\delta^{13}C$ 为 $-26.3\text{‰} \sim -26.4\text{‰}$,烷烃、芳烃和非烃组分分别为 $-27.5\text{‰} \sim -27.8\text{‰}$, $-25.7\text{‰} \sim -25.9\text{‰}$, $-26.6\text{‰} \sim -26.7\text{‰}$ 。饱和烃中正构烷烃分布齐全,并以中低碳数为主(图 2),主峰碳为 nC_{10} ,轻重比($\sum nC_{21-} / \sum nC_{22+}$)为 2.26~2.68;类异戊二烯类烷烃含量较低,Pr/ nC_{17} 和 Ph/ nC_{18} 分别为 0.23~0.25和 0.12,姥植比(Pr/Ph)较大,为 2.04~2.17;不含 β -胡萝卜素。甾烷分布中以规则甾烷为主,孕甾烷系列含量低(图 3A);规则甾烷中 $\alpha\alpha\alpha-C_{27}(20R)$, $\alpha\alpha\alpha-C_{28}(20R)$ 和 $\alpha\alpha\alpha-C_{29}(20R)$ 基本呈“V”字型分布,三者的相对含量分别为 33%,27%,

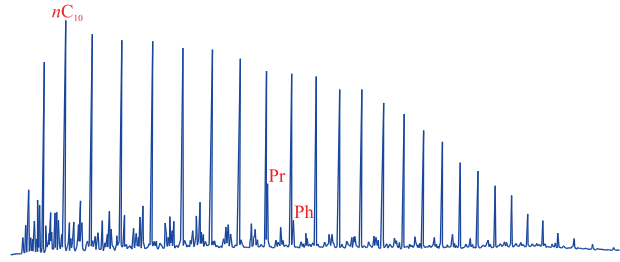


图 2 准噶尔盆地排 2 井轻质油饱和烃气相色谱

Fig. 2 Gas-chromatogram of saturated hydrocarbon of light oil from Well Pai2, Junggar Basin

40%; C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 分别为 0.31~0.37和 0.41~0.47,表明原油为成熟油。萜烷分布中以五环三萜烷为主,三环二萜烷系列在整体含量较低的背景下相对富含 C_{19} 和 C_{20} 三环以及 C_{24} 四环萜烷(图 3A);藿烷系列中伽马蜡烷含量较高,其与 $\alpha\beta-C_{30}$ 藿烷的比值为 0.29;Ts 含量低于 Tm,二者的比值为 0.59。

1.2 轻质油母源分析

轻质油的重碳同位素、高姥植比、不含 β -胡萝卜素、三环萜烷系列中相对富含 C_{19} 和 C_{20} 三环以及 C_{24} 四环萜烷的特征与来自侏罗系煤系烃源岩的原油十分相似^[2];而规则甾烷的近似“V”字型分布、萜烷中较高的伽马蜡烷含量、不是很低的 Ts/Tm 值又与典型的煤系烃源岩特征相差较大,显示了一定量湖相沉积有机质的输入。据此,有的学者提出该类原油是侏罗系煤系与其它层系湖相烃源岩的混源油^[3-4]。

如果有其它层系湖相烃源岩的贡献,则可能是二叠系、白垩系或古近系烃源岩^[5-6]。由于二叠系烃源岩的典型特征是规则甾烷中 $\alpha\alpha\alpha-C_{28}(20R)$ 和

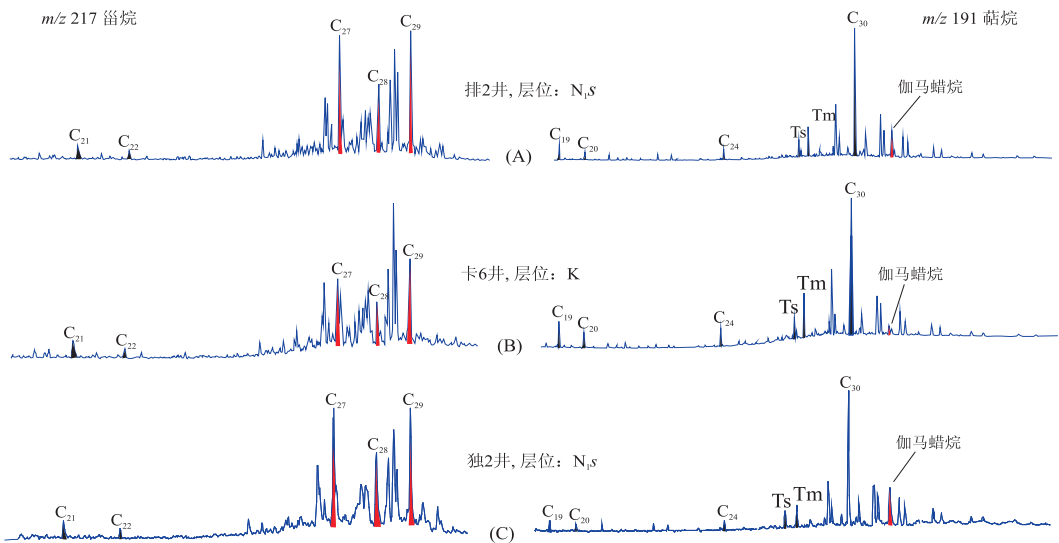


图 3 准噶尔盆地车排子凸起及邻区原油甾、萜烷质量色谱

Fig. 3 Mass chromatograms of sterane and terpane of oils in and around Chepaizi Uplift, Junggar Basin

$\alpha\alpha\alpha-C_{29}$ (20R)含量高,而 $\alpha\alpha\alpha-C_{27}$ (20R)含量低,与以低 $\alpha\alpha\alpha-C_{27}$ (20R)和 $\alpha\alpha\alpha-C_{28}$ (20R)、高 $\alpha\alpha\alpha-C_{29}$ (20R)为特征的侏罗系煤系烃源岩混合不可能形成原油中规则甾烷的“V”字型分布特征;同时,二叠系烃源岩饱和烃中一般含有 β -胡萝卜素烷,而本区原油则不存在;据此,可以排除二叠系烃源岩的贡献。至于白垩系或古近系烃源岩,虽然在规则甾烷的“V”字型分布及较高的伽马蜡烷相对含量这两个特征上与本区原油相似,但二者饱和烃中普遍含有 β -胡萝卜烷的典型特征同样与本区原油不相吻合;同时,勘探实践表明,这两套烃源岩仅分布在昌吉凹陷南缘地区,且成熟范围和生烃规模十分有限,其生成的少量油气不可能跨越如此远的距离运移至车排子地区。另外,本区原油如此重的稳定碳同位素特征也基本可以排除以轻碳同位素为典型特征的上述3套湖相烃源岩的贡献。然而,本区原油的确既具有侏罗系煤系烃源岩特征,同时又具有某些湖相烃源岩的特征,原因何在?笔者认为,这是由于侏罗系烃源岩内部较强的非均质性造成的。

准噶尔盆地侏罗系不但广泛发育煤系地层^[7-9],同时又沉积有较大规模的湖相暗色泥岩。如果某地区的侏罗系沉积主要为单一的煤系或湖相地层,则其生成的原油基本只显示煤成油或湖相原油的特征。然而,侏罗系煤系和湖相烃源岩并不是2个绝对的概念,在总体一致的沉积背景下,两者在很多情况下往往以“混合”的形式出现,提供既有煤系特征、又有湖相特征的“混合型”油气^[10]。以车排子凸起南部四棵树凹陷卡6井(图1)白垩系原油为例,该原油在重碳同位素(-26.35‰)、高姥植比(3.19)、萜烷分布特征(明显高 C_{19} 和 C_{20} 三环以及 C_{24} 四环萜烷)、低伽马蜡烷含量(伽马蜡烷指数仅为0.09)等特征上比排2井沙湾组原油更接近侏罗系煤系沉积有机质特征,但 $\alpha\alpha\alpha-C_{27}$ (20R)、 $\alpha\alpha\alpha-C_{28}$ (20R)和 $\alpha\alpha\alpha-C_{29}$ (20R)规则甾烷依然显示近似的“V”字型分布(图3B),而甾烷分布中显示的这一仅有的“湖相”特征不足以证明该原油中混入了其它的湖相沉积有机质,解释为只来自侏罗系烃源岩更为合理。这类烃源岩总体沉积于偏氧化的环境,陆源有机质输入较多,但在沉积过程中有水体的加深并有低等水生生物有机质的输入,导致其生成的原油总体显示煤系特征,部分指标显示湖相特征,只是不同的原油之间二者的“混合”比例有所不同。在这种情况下,准确区分侏罗系煤系或湖相烃源岩的贡献比例相当困难且意义不大,而将侏罗系烃源岩视为一个整体更为适宜。因此,车排子地区轻质油为来自

侏罗系烃源岩的单源原油,但其中低等水生生物体的输入量要高于卡6井白垩系原油。

2 原油充注方向分析

原油的充注时间与方向,与有效烃源岩的分布范围、生排烃期以及运移通道的发育和聚油区的构造情况密切相关^[11-13]。

2.1 侏罗系烃源岩生排烃史

根据侏罗系沉降史模拟结果及勘探实践,成熟的侏罗系烃源岩主要分布在昌吉凹陷南缘、四棵树凹陷东南部及二者以南的北天山山前断褶带。生烃史模拟结果表明,下侏罗统八道湾组烃源岩在白垩世中期进入生烃期,古近纪中晚期进入大量生油阶段,新近纪中期进入生油高峰,现今主要生油期基本结束;下侏罗统三工河组烃源岩在白垩世中晚期进入生烃期,新近纪早期进入大量生油阶段,现今基本处于生油高峰期;中侏罗统西山窑组烃源岩在古近纪早期进入生烃期,新近纪晚期进入大量生油阶段,目前仍处于大量生油期,但尚未达到生油高峰,与实测镜质体反射率(R_o 为0.80%~0.84%)比较接近。因此,侏罗系烃源岩自新近纪中期以来进入主要生烃期,而主要排烃和运移期应在新近纪晚期至今。

2.2 车排子凸起构造及地层发育史

晚石炭世早期至晚石炭世末,准噶尔盆地转入盆—山发育体系,西准噶尔造山褶皱带不断抬升并向东南方向推覆,由于受北天山造山带阻挡,整个车西南地区强烈隆升,同时在其前方为了削减应力而形成了红车断裂,并向东挤压冲断。晚期海西运动、印支运动和早中期燕山运动期间,车排子凸起继续强烈隆升,使得凸起主体部位缺失了二叠系、三叠系及侏罗系地层,而印支、燕山运动期间车排子凸起活动尤为强烈,断层发育,在车排子凸起东部及北部部分地区形成了部分小型断凹,沉积了较薄的上三叠统及中下侏罗统地层。早白垩世以后,车排子凸起区开始进入缓慢沉降阶段,但其差异沉降特点:早白垩世车排子凸起东部地区发生沉降,沉降幅度和速度均较小,沉积了较薄的下白垩统中下部地层,而车排子凸起西部地区仍为隆起区,地层具有东厚西薄的特点,由昌吉凹陷向车排子凸起超覆尖灭,地层倾向为东倾(图4)。早白垩世中晚期—晚白垩世车排子凸起区沉降再次停止,缺失了下白垩统中上部地层和上白垩统东沟组地层。古近纪以后,又开始缓慢沉降,但差异沉降更为明显。由于四棵树凹陷沉降速度比昌吉凹陷区要大,地层

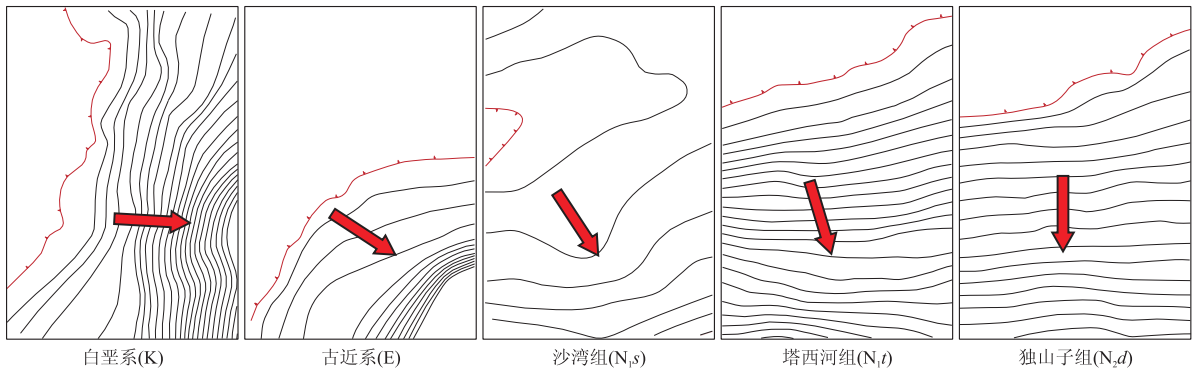


图 4 准噶尔盆地车排子凸起不同层系地层等厚图及地层倾向的演变

Fig. 4 Thickness and tendency of different strata in Chepaizi Uplift, Junggar Basin

倾向由白垩纪时的东倾逐渐转化为东南倾向(图 4),古近系在车排子凸起上沉积范围较小,主要分布在车排子凸起东南部较小范围,沉积了较薄的古近系紫泥泉子组和安集海河组地层。除此之外,车排子凸起中西部广大地区仍为剥蚀区,缺失了古近系地层。新近纪以后,车排子凸起继续沉降,受差异沉降的影响,车排子凸起南部急剧沉降,新近系地层逐渐变为南倾(图 4),由于沉降速度快,导致部分地区地层受到拉张力作用,发育一些正断层,断层走向近东西向。该期沉降以垂直升降为主,沉降范围和幅度均较大,其中沙湾组沉积时期仍表现出一定的差异沉降特点,在车排子凸起北部及西部山前带未能沉积沙湾组地层。沙湾组沉积以后,车排子凸起沉降范围和幅度继续加大直至整体都处于水下,沉积了较厚的塔西河组、独山子组和第四系地层。

2.3 原油充注方向分析

对于车排子凸起轻质油的油源区,有的学者认为是昌吉凹陷西南部侏罗系烃源岩:成熟油气首先通过红车断裂带南端运移至车排子凸起,再在车排子凸起内部向西北运移。笔者认为这一观点值得商榷:首先,由前述,来自侏罗系烃源岩的油气主要排烃和运移期在新近纪晚期至今,此时红车断裂带已停止活动,沟通油气的能力较差;其次,在新近纪晚期至今,车排子新近系地层逐渐变为南倾(图 4),即使有经红车断裂带进入车排子凸起的油气,也主要会沿凸起东缘向北运移,很难再运移至断裂带西侧的排 2、排 8 等井区。笔者认为,车排子地区的轻质油来自其南面的四棵树凹陷东南端及其以南的北天山山前断褶带,独山子油田原油与车排子轻质油的相似性即是很好的证明。

独山子新近系沙湾组原油与车排子轻质油具有非常密切的亲缘关系:该原油也为低密度(0.75~

0.88 g/cm³)的轻质油;原油的稳定碳同位素较重, $\delta^{13}\text{C}$ 为-27‰左右;族组成以饱和烃为主,含量多在 65%以上,芳烃含量为 10%~15%左右,非烃和沥青质含量很低;甾烷分布中以规则甾烷为主,孕甾烷系列化合物含量低,规则甾烷中 $\text{C}_{27}-\text{C}_{29}$ 呈“V”字型分布(图 3C), C_{29} 甾烷 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 分别为 0.29~0.37 和 0.37~0.47,表明原油也为成熟油;萜烷分布中以藿烷系列为主,三、四环萜烷丰度很低且分布齐全($\text{C}_{19}-\text{C}_{26}$), C_{19} , C_{20} 三环及 C_{24} 四环萜烷含量相对较高(图 3C);伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷为 0.25~0.33。从上述参数的对比可知,独山子与车排子凸起原油特征十分相近,应来自同一油源区。独山子油田处于四棵树凹陷东南端及与其相连的北天山山前断褶带内侏罗系烃源岩深埋区(即乌苏、奎屯以南的深凹区)之上,无疑是成熟的侏罗系原油经深部断裂向上运移成藏所致。因此,车排子凸起轻质油也应来源于此。

车排子凸起和南部的乌苏、奎屯以南的油源区之间虽然没有南北向深大断裂相沟通,但在准噶尔盆地西部,新近系沙湾组普遍发育扇三角洲前缘和滨浅湖相,其间沉积了储层物性较好的厚砂层(图 5),完全可以作为油气运移的良好通道。四棵树凹陷东南端及其以南山前断褶带内成熟的侏罗系原油经深部断裂向上运移至沙湾组后,首先可以在就近的圈闭形成油藏(独山子油田);同时,由于侏罗系烃源岩的生排烃自新近纪至今是一个连续的过程,后续生成的成熟度更高的油气则会经南倾的沙湾组厚砂层继续向北或北偏西的方向侧向运移至车排子地区(图 6),并在合适的沙湾组圈闭聚集成藏。排 2 井原油与独山子原油相比,族组成中更高的饱和烃含量、不含沥青质正是表明了原油运移了更远的距离;饱和烃中更高的甾烷异构化参数一方

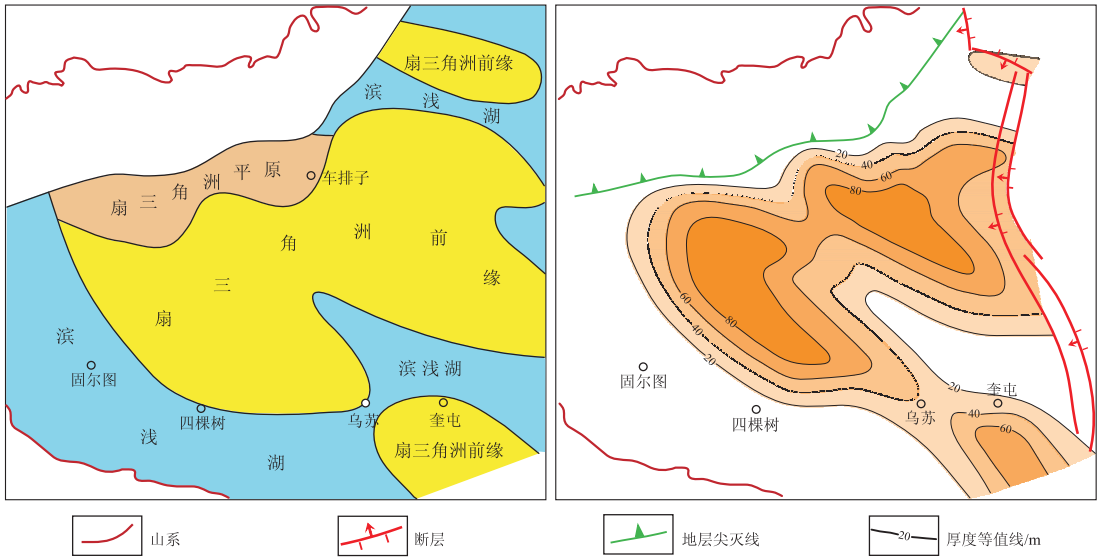


图 5 准噶尔盆地西部新近系沙湾组沉积相与砂层等厚线

Fig. 5 Sedimentary facies and sand thickness of Neogene Shawan Formation, west of Junggar Basin

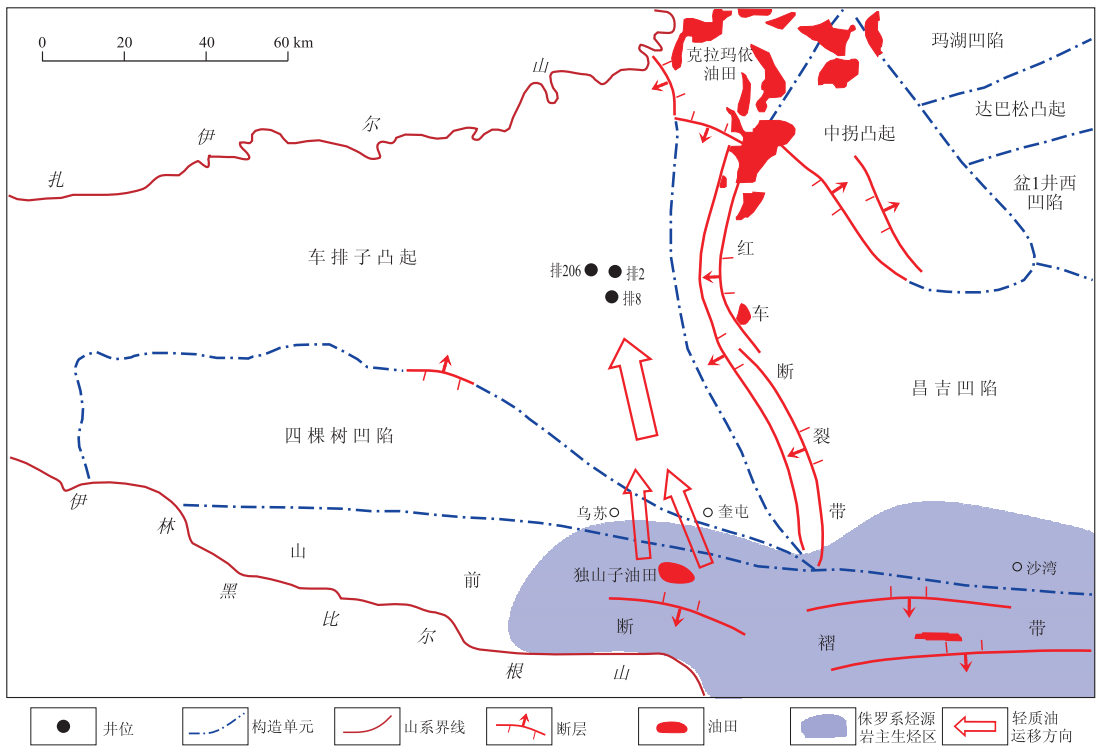


图 6 准噶尔盆地车排子凸起轻质油充注方向示意

Fig. 6 Migrating direction of light oil in Chepaizi Uplift, Junggar Basin

面说明排 2 井原油的成熟度要高于独山子原油,另一方面也是运移效应所致:因为随着运移距离的增加,甾烷 $C_{29} 20S/(20S + 20R)$ 和 $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 都会有逐渐增大的趋势^[14]。

3 结论

1) 车排子凸起轻质油为侏罗系烃源岩的单源原油,其既具“煤系”、又具“湖相”的特征是侏罗系

烃源岩内部非均质性的反映,而非侏罗系煤系烃源岩与其它层系湖相烃源岩的混源。

2) 车排子凸起轻质油来自南部的四棵树凹陷东南端及北天山山前断褶带,油源区内成熟的侏罗系油气由深部断裂垂向运移至上部沙湾组地层后,再经沙湾组厚砂层向北或北偏西方向侧向运移至车排子地区,并在合适的圈闭聚集成藏。

(下转第 436 页)

2009,31(1):101-104.

[33] Tsuzuki N, Takeda N, Suzuki M, et al. The kinetic modeling of oil cracking by hydrothermal pyrolysis experiments [J]. International Journal of Coal Geology, 1999, 30: 227-250.

[34] Darouich T A, Behar F, Largeau C. Thermal cracking of the light aromatic fraction of Safaniya crude oil-Experimental study and compositional modeling of molecular classes [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(9): 1130-1154.

[35] Darouich T A, Behar F, Largeau C. Pressure effect on the thermal cracking of the light aromatic fraction of Safaniya crude oil: Implications for deep prospects [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(9): 1155-1169.

[36] 尹长河, 王廷栋, 王顺玉, 等. 威远-资阳震旦系干酪根与油裂解气的鉴别 [J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 156-160.

[37] Seewald J S. Aqueous geochemistry of low molecular weight hydrocarbons at elevated temperatures and pressures: Con-

straints from mineral buffered laboratory experiments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(10): 1641-1664.

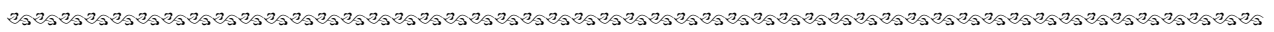
[38] Pan Changchun, Yu Linping, Liu Jinzhong, et al. Chemical and carbon isotopic fractionations of gaseous hydrocarbons during abiogenic oxidation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(1-2): 70-89.

[39] Rooney M A, Claypool G E, Chung H M. Modeling thermo-genic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons [J]. Chemical Geology, 1995, 126: 129-232.

[40] Tang Y, Perry J K, Jenden P D, et al. Mathematical modeling of stable carbon isotope ratios in natural gases [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 2673-2687.

[41] Xiao X M, Zeng Q H, Tian H, et al. Origin and accumulation model of the AK1 natural gas pool from the Tarim Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(9): 1285-1298.

(编辑 韩 或)



(上接第 423 页)

致谢: 胜利油田地质科学研究院沈扬高级工程师、庄新明高级工程师提供了区域地质方面的资料, 在此深表感谢。

参考文献:

[1] 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 17-22.

[2] 惠荣耀, 张继忠. 准噶尔盆地南缘煤成油的地球化学特征 [J]. 沉积学报, 1990, 8(1): 29-36.

[3] 由伟丰, 孟闲龙. 准噶尔盆地车排子地区排 2 井油源分析 [J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(1): 56-59.

[4] 张枝焕, 李伟, 孟闲龙, 等. 准噶尔盆地车排子隆起西南部原油地球化学特征及油源分析 [J]. 现代地质, 2007, 21(1): 133-140.

[5] 阿布力米提, 唐勇, 李臣, 等. 准噶尔盆地南缘前陆盆地白垩系生油的新认识 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25(4): 456-460.

[6] 郭春清, 沈忠民, 张林晔, 等. 准噶尔盆地南缘烃源岩生源特征及原油分类 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2005, 32(3): 257-262.

[7] 王居峰, 邓宏文, 蔡希源. 准噶尔盆地中部侏罗系层序地层格架 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 23-26.

[8] 尹伟, 郑和荣. 准噶尔盆地中部油气成藏期次及勘探方向 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 216-220.

[9] 刘银河. 准噶尔盆地侏罗系沉积构造与油气分布 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 12-15.

[10] 王传刚, 王铁冠, 陈建平, 等. 对准噶尔盆地东部彩南油田侏罗系油藏原油族 (组) 群类型的认识 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 183-189.

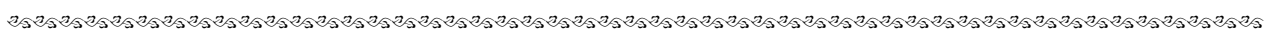
[11] 姜振学, 庞雄奇, 黄志龙. 叠合盆地油气运聚期次研究方法及应用 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 22-25.

[12] 李明诚. 对油气运聚研究中一些概念的再思考 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 13-16.

[13] 谭明友, 张云银, 宋传春, 等. 准噶尔盆地油气幕式成藏规律探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 28-31.

[14] 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.

(编辑 徐文明)



(上接第 427 页)

[17] 罗霞, 胡国艺, 张福东, 等. 千米桥奥陶系潜山天然气气源对比 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 41-43.

[18] 夏新宇, 赵林, 戴金星, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳气藏天然气来源及混源计算 [J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 75-78.

[19] 耿安松, 熊永强. 应用 GC-IRMS 技术测定气源岩热解产物中轻烃的碳同位素组成 [J]. 科学通报, 2000, 45(S1): 2695-2698.

[20] 段毅, 周世新. 塔里木盆地石炭系烃源岩热模拟实验地球化学研究 [J]. 沉积学报, 1999, 17(S1): 832-835.

(编辑 黄 娟)