

塔里木盆地库车坳陷中、新生界高蜡凝析油和轻质油形成及其控制因素

苏洲^{1,2},张慧芳²,韩剑发²,刘永福²,孙琦²,白银²,段云江²,屈洋²

(1. 长江大学 地球物理与石油资源学院,湖北 武汉 430100; 2. 中国石油 塔里木油田公司,新疆 库尔勒 841000)

摘要:大量的原油样品数据表明库车坳陷中、新生界凝析油和轻质油以高含蜡为特征,结合前人的研究成果和现有资料对库车坳陷高蜡凝析油和轻质油的成因和控制因素进行了分析。分析结果表明,烃源岩有机显微组分中部分壳质组和腐泥组形成了高蜡油,镜质组形成了凝析油和轻质油,三者共同决定了库车坳陷高蜡凝析油和轻质油的形成。原油含蜡量主要受3个因素控制:原油成熟度、油气藏类型、气洗作用和原油运移作用。原油成熟度为主要控制因素,库车坳陷原油是烃源岩在成熟阶段下热演化生成的,原油成熟度 R_o 介于0.8%~1.05%,总体表现为高含蜡的特征,且原油含蜡量随原油成熟度增加而降低;油气藏类型为次要控制因素,干气藏原油含蜡量小于5%,凝析油含量低的凝析气藏原油含蜡量介于5%~10%,凝析油含量高的凝析气藏和油藏原油含蜡量大于10%,且原油含蜡量随生产气/油比的对数的减小而增加;气洗作用和原油运移作用影响最小,相同油源条件下,原油受气洗程度越强,原油含蜡量越低,原油运移距离越大,原油含蜡量也越低。

关键词:形成机理;原油成熟度;气/油比;高蜡凝析油;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Origin and controlling factors of Mesozoic-Cenozoic gas condensates with high wax content and high-gravity oil in Kuqa Depression

Su Zhou^{1,2}, Zhang Huifang², Han Jianfa², Liu Yongfu², Sun Qi², Bai Yin², Duan Yunjiang², Qu Yang²

(1. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Hubei, Wuhan 430100, China;

2. Tarim Oilfield Company Ltd., PetroChina, Xinjiang, Korla 841000, China)

Abstract: The analysis of a large number of oil samples demonstrates that the Mesozoic-Cenozoic gas condensates and high-gravity oil in Kuqa Depression feature a high wax content. The study discusses the origin and controlling factors of gas condensates with high wax content and high gravity oil in Kuqa Depression based on previous research and available data. The results show that some exinite and sapropelinite of the organic macerals in source rocks are turned into oil with high wax content, whilst vitrinite of the organic macerals produces gas condensates and high-gravity oil. These organic macerals determine the production of gas condensates with a high wax content and high-gravity oil in Kuqa Depression. The wax content in crudes is mainly controlled by three factors: oil maturity, hydrocarbon reservoir type, gas washing and oil migration. Among them, the oil maturity is predominant. The oil in Kuqa Depression is generated by thermal evolution of source rocks during its mature stage, with oil maturity R_o ranging between 0.8% - 1.05%, while the crudes as a whole are characterized by a high wax content, and the wax content in crudes decreases with increasing oil maturity. Besides, the hydrocarbon reservoir type plays a secondary role. The wax content of crudes is less than 5% in dry gas reservoirs, ranges between 5% - 10% in condensate gas reservoirs with low gas condensates, while is more than 10% in condensate gas reservoirs with high content of gas condensates and oil reservoirs; the wax content of crudes increases with the decrease of log-ratio of producing gas/oil ratio of hydrocarbon reservoirs. In addition, the effect of gas washing and oil migration ranks last. Under the same oil source conditions, the higher degree of gas washing the crudes undergo, the lower the wax content of crudes will be; meanwhile the farther the crudes migrate, the lower the wax content of crudes will be.

收稿日期:2017-10-23;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:苏洲(1986—),男,博士研究生、工程师,地球探测与信息技术。E-mail:suzhou200508136@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001-001)。

Key words: formation mechanism, oil maturity, gas/oil ratio, gas condensate with high wax content, Kuqa Depression, Tarim Basin

凝析油是指在地下深处高温、高压状态下呈气态的烃类,采至地面后随着温度、压力的降低而呈液态的轻质油。常温常压下,凝析油为无色透明或浅黄色液体,密度一般为 $0.65 \sim 0.78 \text{ g/cm}^3$,胶质、沥青质、蜡质含量低或不含,烃类组分以中-低分子量的饱和烃为主, C_{21-}/C_{22+} 值远大于1,烃类含量随碳数增大而迅速下降。目前关于凝析油的成因类型有两种解释^[1-2]: ①腐泥型有机质在高成熟阶段容易生成凝析油,长链烷烃在高演化阶段被裂解成短链烷烃,从而形成高熟凝析油;②有机质在低成熟阶段也可以形成凝析油,生烃母质通常富含树脂体、木栓质体、角质体、植物蜡、孢子花粉等,这些物质在低演化阶段容易产生分子量低的液态烃,形成未熟-低熟凝析油。另外煤中具有短烷基侧链的镜质组在低演化阶段也可以形成凝析油,这种凝析油通常富含芳香烃。

石油蜡是从石油中结晶析出的固态烷烃混合物,主要成分为 $C_{16}—C_{90}$ 的正构烷烃,异构烷烃、环烷烃和芳香烃。其中正构烷烃占主要成分的称为石蜡(显晶蜡),碳数范围 $C_{16}—C_{36}$;环烷烃和芳香烃占主要成分的称为地蜡(微晶蜡),碳数范围 C_{37} 以上^[3-4]。以往认为石油中蜡质主要来源于陆相高等植物,且一般认为陆相原油高含蜡,海相原油低含蜡。近年来越来越多的专家学者们认识到低等水生生物,如细菌、藻类也可以生成高蜡油。黄第藩等通过研究塔里木盆地古生界干酪根的显微组成和不同成熟度演化产物,认为由菌藻类脂组形成的干酪根中的长链脂肪烃在高温演化阶段被释放是海相高蜡油形成的主要原因^[5];韩霞等发现由富含脂肪族结构的藻类体和孢子体构成的无定形体对辽河断陷大民屯凹陷高蜡油形成具有重要贡献^[6]。吕慧等运用双质谱技术对比分析了济阳拗陷东营凹陷高蜡油和古近系沙四段上亚段烃源岩的正常原油,证明藻类等低等水生生物是东营凹陷南斜坡高蜡油形成的重要母质^[7]。

高蜡凝析油和轻质油是由相对分子质量较高的固态石蜡烃大量分散溶解于天然气或较低相对分子质量的液态烃中的一种特殊油气资源,它既不同于常规的高蜡原油,也不同于一般意义上的凝析油。这类原油具有低密度、低粘度、高凝固点、高含蜡量的特点,一般饱和烃质量分数较高,非烃质量分数较低,不含或含少量沥青质和胶质,能检测到碳数在 C_{60} 以上的正构烷烃^[2]。目前我国关于这种特殊类型油气的报道并不多

见,仅在黄骅拗陷千米桥潜山和吐哈盆地西部地区有高蜡凝析油形成机理方面的研究。卢鸿等对黄骅拗陷近30年来3300多个原油油样含蜡量的时空分布特征进行了研究,研究结果表明黄骅拗陷千米桥潜山高蜡凝析油的形成受“地层色效应”控制,即随着油气运移距离增加含蜡量降低,越靠近烃源岩含蜡量越高^[8];张枝焕等对比分析了吐哈盆地西部地区中、新生界高蜡凝析油地球化学特征与烃源岩有机显微组分和成熟度,明确了有机显微组分中含量较高且活化能相当的镜质组和壳质组,是高蜡油与凝析油共生的地球化学条件^[9]。

塔里木盆地库车拗陷内凝析油气资源丰富,已发现多个凝析气田,开采出的凝析油含蜡量高(大多高于10%),属于高蜡凝析油和轻质油。目前关于库车拗陷高蜡凝析油控制因素分析的相关报道比较少见,笔者在前人研究成果的基础上,结合库车拗陷现有的资料对库车拗陷高蜡凝析油成因、分布规律及控制因素进行分析总结,该研究对完善中国高蜡凝析油成因及分布规律具有重要意义。

1 地质概况和地化特征

库车拗陷位于塔里木盆地北缘的南天山造山带与塔北隆起之间,西起塔克拉,东至库尔勒,是塔里木盆地北部的一个中、新生代拗陷,东薄西厚,东窄西宽,总体上呈NEE向展布,南北宽40~90 km,东西长470 km,面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。库车拗陷可进一步划分为7个次级构造单元(图1),即:北部单斜带、克拉苏-依奇克里克冲断带、乌什凹陷、拜城凹陷、阳霞凹陷、秋里塔格冲断带、南部斜坡带等^[10]。

库车拗陷内分布着大量的油气藏,油气藏类型多样。克拉苏-依奇克里克冲断带上分布着克拉和克深干气气田,大北、博孜、迪北和吐孜洛克凝析气田;乌什凹陷上发现神木1油藏,依拉克凝析气藏;秋里塔格冲断带上分布着迪那凝析气田;南部斜坡带上分布着却勒1和红旗1油藏,提尔根、英买6和东河12凝析气藏,玉东凝析气田,羊塔克、英买力和牙哈油气田。拗陷内发育有三叠系湖相和侏罗系煤相烃源岩,烃源岩延伸范围广,北起南天山,南至羊塔6井,西至神木1井,东至野云2井。北部克拉苏冲断带,烃源岩埋藏深,成熟度高,以生气为主,原油含蜡量低;南部斜坡

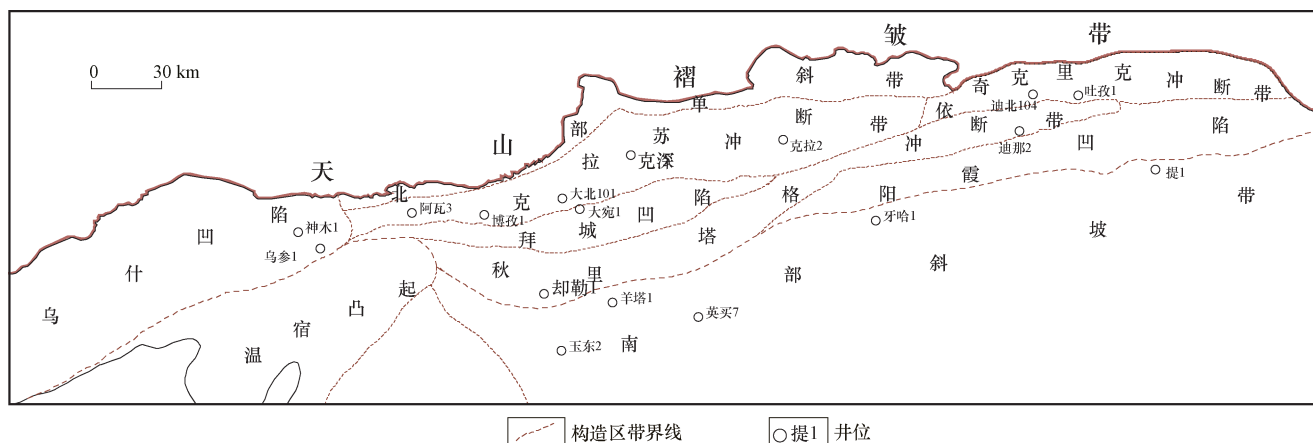


图1 库车坳陷构造划分简图

Fig. 1 Structure division of Kuqa Depression

带、西部乌什凹陷和东部依奇克里克冲断带,烃源岩埋藏浅,成熟度低,以生油、凝析油、凝析气为主,原油含蜡量高,库车坳陷中新生界高蜡凝析油和轻质油主要分布于此。

按照原油含蜡量介于0.5%~2.5%为低蜡油,介于2.5%~10%为中蜡油,大于10%为高蜡油的标准,对库车坳陷各区块原油含蜡量进行统计划分,划分结果见表1。

吐孜洛克凝析气田原油含蜡量最低,介于1.09%~6.2%,平均为2.57%,属于低-中蜡油,原油密度低,平均为0.811 8 g/cm³,粘度低,平均为0.801 7 mPa·s,凝点低,平均为-24℃,胶质和沥青质含量低。原油中饱和烃平均含量89%,芳烃4%,非烃1%,沥青质5%,CPI值0.92~1.38,OEP值0.79~1.04,主峰碳数10。

博孜凝析气田原油含蜡量介于3.4%~9.9%,平均为7.28%,迪那凝析气田原油含蜡量介于2.53%~9.95%,平均为6.27%,提尔根凝析气田原油含蜡量介于4.7%~10.6%,平均为7.03%,迪北凝析气田原油含蜡量介于2.2%~12.2%,平均为6.95%,均属于中蜡油,原油密度低,均小于0.83 g/cm³,粘度低,均小于2 mPa·s;克深干气藏中的原油含蜡量介于3%~4.1%,平均为3.57%,也属于中蜡油,然其原油密度为0.852 3 g/cm³,为正常原油,粘度较高,为2.621 6 mPa·s。这些气藏中的原油胶质和沥青质含量都低,原油粘度和凝点都较吐孜洛克凝析气田高。原油中饱和烃平均含量85%,芳烃8%,非烃2%,沥青质含量少2%,CPI值0.97~1.27,OEP值1.01~1.27,主峰碳数10~13。

大北凝析气田原油含蜡量介于3%~22%,平均为10.06%,玉东凝析气田原油含蜡量介于3.38%~25.8%,平均为12.64%,英买力油气田原油含蜡量介

于3.1%~26.2%,平均为12.2%,大宛齐油田原油含蜡量介于3.14%~14.95%,平均为8.55%,均属于中-高蜡油,原油密度低,均小于0.83 g/cm³,粘度低,均小于2 mPa·s;克拉2干气藏中的原油含蜡量介于2.7~18.8%,平均为8.39%,也属于中-高蜡油,然其原油密度为0.888 g/cm³,为正常原油,粘度较高,为2.018 1 mPa·s。这些油气藏中的原油胶质和沥青质含量都低,原油粘度和凝点都较中蜡油的高。原油中饱和烃平均含量84%,芳烃5%,非烃3%,沥青质4%,CPI值0.95~1.16,OEP值0.91~1.08,主峰碳数10~14。

牙哈油气田原油含蜡量介于7.44%~32.8%,平均为15.65%,羊塔克油气田原油含蜡量介于10.2%~33.19%,平均为16.34%,依拉克凝析气藏原油含蜡量介于8.6%~24.5%,平均为18.19%,神木1油藏原油含蜡量介于11.19%~21%,平均为14.8%,均属于高蜡油,原油密度低,均小于0.83 g/cm³,粘度介于1.431 5~2.467 3 mPa·s;却勒1油藏中的原油含蜡量介于12.1%~27.6%,平均为17.94%,也属于高蜡油,然其原油密度为0.840 6 g/cm³,为正常原油,粘度较高,为5.624 9 mPa·s。这些油气藏中的原油胶质和沥青质含量都低,原油粘度和凝点都较中-高蜡油的高。原油中饱和烃平均含量74%,芳烃11%,非烃5%,沥青质7%,CPI值1.0~1.24,OEP值0.98~1.13,主峰碳数10~20。

大量的原油分析数据得出库车坳陷原油总体上表现为高蜡凝析油和轻质油的特征,具有低密度、低粘度、胶质和沥青质含量低、高凝固点、中-高含蜡的特点,饱和烃含量最高,平均在70%以上,芳烃次之,非烃和沥青质含量少,碳数分布以轻烃为主,主峰碳以10~14居多。构造位置上主要分布在库车坳陷南部

表 1 库车坳陷各区块含蜡原油特征

Table 1 Features of waxy oil of different blocks in Kuqa Depression

区块	原油层位	含蜡量/%	原油含蜡性质	20℃密度/(g·cm ⁻³)	50℃动力粘度/(mPa·s)	凝固点/℃	胶质含量/%	沥青质含量/%
吐孜	N _{1j}	1.09~6.20/2.57(33)	低-中	0.793 1~0.829 8/0.811 8(33)	0.591 0~1.036/0.801 7(33)	-30~-0/-24.000 0(33)	0~0.29/0.020 0(33)	0~0.01/0(33)
克深	K	3.00~4.10/3.57(7)	中	0.848 6~0.856 6/0.852 3(7)	2.419 0~2.841/2.621 6(7)	-18~-6/-11.000 0(7)	0.40~4.10/1.570 0(7)	0.580~2.60/1.490 0(7)
提尔根	K	4.70~10.60/7.03(7)	中	0.764 6~0.800 7/0.786 9(7)	0.527 4~1.203/0.946 4(7)	-30~-8/-6.570 0(7)	0~0.47/0.192 9(7)	0~0.23/0.092 9(7)
迪北	J _{1a}	2.20~12.20/6.95(37)	中	0.739 2~0.825 6/0.803 2(37)	0.347 4~1.460/0.963 3(37)	-30~-10/-4.220 0(37)	0~2.56/0.705 5(37)	0~1.74/0.195 7(37)
迪那	E	2.53~9.95/6.27(251)	中	0.771 5~0.820 4/0.801 7(251)	0.465 4~1.381/0.927 1(251)	-16~-14/1.000 0(251)	0~1.72/0.180 0(251)	0~1.61/0.040 0(251)
博孜	K	3.40~9.90/7.28(15)	中	0.774 5~0.807 7/0.787 8(15)	0.701 3~1.438/0.931 3(15)	-4~-12/4.000 0(15)	0~1.13/0.280 0(15)	0~0.97/0.140 0(15)
克拉	K	2.70~18.80/8.39(38)	中-高	0.815 8~0.852 4/0.888 0(38)	0.746 2~4.193/2.018 1(38)	-30~-34/6.875 0(38)	0~4.40/0.492 8(38)	0~0.2/0.027 2(38)
大宛齐	N _{2k}	3.14~14.95/8.55(94)	中-高	0.780 1~0.882 9/0.795 9(94)	0.704 2~4.31/1.019 8(94)	-30~-12/0.531 9(94)	0~1.09/0.210 0(94)	0~0.19/0.060 0(94)
大北	K	3.00~22.00/10.06(206)	中-高	0.784 2~0.884 0/0.806 3(206)	0.773 8~2.227/1.436 7(206)	-20~-22/10.000 0(206)	0~2.43/0.380 0(206)	0~7.82/0.140 0(206)
阿瓦3	K	9.60~12.20/11.03(3)	中-高	0.795 9~0.804 0/0.801 2(3)	0.957 9~1.187/1.099 3(3)	6~-8/7.000 0(3)	0.17~0.20/0.180 0(3)	0.030~0.04/0.030 0(3)
英买	E+K	3.10~26.20/12.20(176)	中-高	0.760 3~0.828 2/0.783 1(176)	0.316 5~5.015/1.383 8(176)	-16~-32/10.870 0(176)	0~5.85/1.000 0(176)	0~4.65/0.183 0(176)
玉东	E+K	3.38~25.80/12.64(87)	中-高	0.765 7~0.801 6/0.785 7(87)	0.828 6~3.390/1.292 3(87)	6~-22/15.000 0(87)	0~0.99/0.100 0(87)	0~1.00/0.060 0(87)
牙哈	E+K+N7.44~32.80/15.65(166)	高	0.771 6~0.893 2/0.806 0(166)	0.858 0~10.750/2.297 0(166)	-6~-28/14.570 0(166)	0~10.51/0.830 0(166)	0~11.76/0.450 0(166)	
羊塔克	E+K	10.20~33.19/16.34(91)	高	0.784 2~0.804 6/0.794 0(91)	1.100 0~2.814/1.431 5(91)	12~-28/19.000 0(91)	0~1.64/0.120 0(91)	0~0.73/0.030 0(91)
依拉克	K	8.60~24.50/18.19(16)	高	0.789 8~0.825 0/0.805 9(16)	1.336 0~2.300/1.662 0(16)	0~22/11.860 0(16)	0.24~2.82/1.240 0(16)	0.056~2.70/0.703 1(16)
神木1	K	11.19~21.00/14.8(8)	高	0.821 2~0.837 8/0.827 7(8)	2.809 0~4.898/3.650 6(8)	20~-28/21.400 0(8)	1.15~4.27/3.150 0(8)	0~2.41/0.880 0(8)
却勒	E	12.10~27.6/17.94(30)	高	0.812 7~0.883 0/0.840 6(30)	3.242 0~9.950/5.624 9(30)	16~-32/25.000 0(30)	1.60~6.20/3.60 0(30)	0.016~1.32/0.320 0(30)

注:表中数据为最小值~最大值/平均值(样品个数)。

斜坡带、西部乌什凹陷和东部依奇克里克冲断带上。随着原油含蜡量的增加,原油中饱和烃含量降低,芳烃和非烃含量增加,主峰碳数、原油的粘度和凝点都呈增加趋势。

2 高蜡凝析油和轻质油母质成因

库车坳陷发育有三叠系黄山街组(T_3h)、塔里奇克组(T_3t)、侏罗系阳霞组(J_{1y})、克孜勒努尔组(J_2k)和恰克马克组(J_2q)5套烃源岩,形成环境复杂多变,从深湖相、半深湖相至沼泽相均很发育。三叠、侏罗系烃源岩除恰克马克组湖相泥岩腐泥组、壳质组含量较高,分别为15.54%和43.08%,镜质组、惰质组含量相对较低,分别为30.43%和10.95%外,其他4套烃源岩腐泥组、壳质组含量低(大多不超过10%),镜质组、惰质组含量高,镜质组大多高于50%,惰质组含量在30%左右(表2)。恰克马克组烃源岩表现为Ⅰ-Ⅱ型有机质特点,其余四套烃源岩表现为Ⅲ型有机质特点。阳霞组部分泥岩样品在显微镜下可以见到个体完整的藻类体和孢子体富集的孢子堆;恰克马克组样品在显微镜下可以看到丰富的层状藻类体和少量的结构藻类体,镜下还发现个体完整的丛粒藻。库车河剖面上克孜勒努尔组中有一层约30 cm的油页岩,它几乎完全由藻类组成,呈层状分布,有机显微组分组成中其含量大于70%。这些都表明库车坳陷烃源岩有机质具有陆相高等植物和低等水生生物双重来源,属于混源型有机质,但以陆源有机质为主。

高等植物角质体、树脂体、孢粉体、细菌及各种藻类都能成为原油中蜡的重要来源。角质体来源于高等植物的角质层,主要由高脂肪性的生物聚合物和植物

蜡组成,其中植物蜡主要由高碳数的直链烃(C_{22} — C_{36})和长链脂肪酸(C_{15} — C_{35})组成,多数学者将其作为易于转化生成高蜡油的显微组分^[9,11-13]。阳霞组和克孜勒努尔组中的炭质泥岩角质体平均含量相对其它烃源岩较高为3%~4%,可以将角质体作为二者生成高蜡凝析油和轻质油的重要母质。

藻类能在其细胞外壁形成一种藻胶鞘,也称藻质素,是一种不溶于水、富含脂肪族结构、对化学和微生物降解有很强抵抗力的大分子生物聚合物,能够在漫长的沉积和成岩的过程中被选择性地保存下来,一些藻类如丛粒藻、盘星藻、蓝绿藻、粘球形藻、四角藻等,它们形成的干酪根在未熟-低熟阶段就可以热解生成大量的高碳数正构烷烃^[14-15]。阳霞组、克孜勒努尔组和恰克马克组部分烃源岩样品中都见到大量的藻类体,其显微组分中藻类体平均含量可高达15%,可将藻类体作为三者生成高蜡凝析油和轻质油的重要母质。

镜质组的化学结构是由芳香烃和短链烷烃组合而成,其中的短链烷烃在低成熟-过成熟阶段都容易裂解出来而生成低碳数烃类,成为湿气、轻质油或凝析油的重要组成部分。吐哈盆地高蜡凝析油和轻质油的形成就是由其有机质显微组分决定的,吐哈盆地侏罗系烃源岩为煤系地层,有机显微组分以镜质组为主,惰质组次之,壳质组以角质体、无定形体和孢粉体为主。壳质组中的角质体、孢子体活化能为51~56 kcal/mol,树脂体、木栓质体活化能为40 kcal/mol,镜质组活化能也为51~56 kcal/mol,因此大部分壳质组和镜质组的活化能相当,在低熟-成熟热演化阶段,壳质组热演化生成高蜡凝析油和轻质油的高蜡油部分,镜质组热演化生成凝析油和轻质油部分^[9]。

表2 库车坳陷主要烃源岩有机显微组分统计

Table 2 Statistics of organic macerals of major source rocks in Kuqa Depression

层位	岩性	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%				腐泥组/%
				孢子体	角质体	树脂体	壳屑体	藻类体
J_2q	湖相泥岩	30.43	10.95	43.08	0	0	0	15.54
	煤系泥岩	73.00	18.92	0.74	0.59	0	1.38	5.37
J_2k	炭质泥岩	64.70	15.24	1.32	3.12	0.14	5.45	10.03
	煤	68.99	26.05	1.57	0.70	0.05	0.31	2.33
J_{1y}	煤系泥岩	59.77	30.81	0.63	1.59	0	2.49	4.71
	炭质泥岩	53.08	15.04	4.40	4.16	0.38	7.00	15.94
	煤	69.37	27.29	0.66	0.55	0.02	0.44	1.67
T_3t	煤系泥岩	51.41	45.07	0	0.36	0	1.40	1.76
	煤	84.81	14.61	0.05	0	0	0.24	0.29
T_3h	湖相泥岩	44.03	50.27	0.77	0.39	0.06	1.78	2.70

注:以上数据均为平均值。

库车坳陷三叠系、侏罗系烃源岩有机显微组分组成与吐哈盆地侏罗系烃源岩有很大的相似性,也是以镜质组为主,惰质组次之,壳质组以孢子体和角质体为主,但库车坳陷烃源岩中藻类体含量相对吐哈盆地高,并且藻类体也具有较低的活化能。因此,库车坳陷高蜡凝析油和轻质油的高蜡油部分是由壳质组中的孢子体、角质体和腐泥组中的藻类体生成,凝析油和轻质油部分是由镜质组生成。壳质组、腐泥组中的藻类体和镜质组三者是库车坳陷高蜡凝析油和轻质油形成的物质基础,三者具有相当的活化能又是库车坳陷高蜡凝析油和轻质油形成的化学条件。

3 原油含蜡量控制因素

3.1 原油成熟度

确定原油成熟度常用的是分子成熟度参数,然而许多常用的分子成熟度参数均有其自身的局限性,如升藿烷 $C_{31}22S/(22S+22R)$ 比值仅适用于 R_o 小于 0.65% 有机质热演化的早期阶段,甾烷 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值只适用于 R_o 小于 0.8% 的生油高峰前的演化阶段。而甲基菲指数(MPI)作为成熟度参数具有较广的适用范围^[16],包建平等^①在大量研究库车坳陷露头烃源岩和钻井烃源岩样品的基础上,得出了

适用于库车坳陷原油成熟度的经验公式:

$$R_o = 0.168 5MPI_1 + 0.716 7 \tag{1}$$

其中: $MPI_1 = (2 - MP + 3 - MP)/(1 - MP + 9 - MP)$ 。依据该经验公式,计算出库车坳陷含蜡原油相对应的原油成熟度(表 3),计算结果表明库车坳陷原油均属正常成熟原油,原油成熟度 R_o 介于 0.8% ~ 1.05%,是烃源岩在成熟阶段的产物。图 2 揭示了库车坳陷原油含蜡量与原油成熟度之间呈负相关关系,随着原油成熟度增加,原油含蜡量降低。

当有机质 R_o 介于 0.8% ~ 1.2% 时,烃源岩进入生油高峰,奇偶优势消失,碳优势指数 CPI 小于 1.2,这与第一节中描述库车坳陷原油地化特征相一致。随着有机质热演化程度的增加,长链烷烃裂解形成短链烷烃,正构烷烃碳原子数及分子量递减,原油含蜡量递减。当有机质 R_o 小于 0.7% 时,也即烃源岩处于低热演化阶段,有机质断链几率小,主要表现为脱官能团,易形成高碳数烃类,在此阶段原油含蜡量与原油成熟度之间可呈正相关关系。济阳坳陷东营凹陷孔店组高蜡油是烃源岩处于生油高峰前形成的烃类,其原油含蜡量就表现为随原油成熟度增加而增大^[7]。大民屯凹陷北部生油岩热演化程度较低,形成的原油全部为高蜡油,而凹陷中、南部地区生油岩热演化程度较高,早期生成的高分子量烃类部分遭裂解形成低分子量烃

表 3 库车坳陷原油成熟度与含蜡量数据
Table 3 Oil maturity and wax content of crudes in Kuqa Depression

井名	层位	$R_o/\%$	含蜡量/%	井名	层位	$R_o/\%$	含蜡量/%
克深 102	K	1.05	3.23	却勒 1	E	0.93	12.73
克拉 2	K	0.95	7.78	羊塔 101	E + K	0.82	12.60
大北 102	K	0.92	10.08	羊塔 1 - 11	E + K	0.83	17.85
大北 2	K	0.94	11.34	羊塔克 5 - 1T	K	0.90	15.99
大北 201	K	0.93	10.53	羊塔 1 - 9	K	0.82	13.35
大宛 111 - 7	K	0.92	7.15	玉东 4	E	0.89	13.99
迪那 11	E	1.04	4.55	玉东 102	E	0.87	15.05
迪那 201	E	0.99	5.38	英买 16	E	0.93	8.67
迪那 202	E	1.02	6.33	英买 21C	E	0.96	7.83
迪那 2 - 12	E	1.03	6.64	英买 23	E	0.83	14.54
迪那 2 - 14	E	0.91	6.11	牙哈 1	E	0.85	11.69
迪西 1	J ₁ a	0.98	6.50	牙哈 104	E	0.83	19.70
依南 2	J ₁ a	1.01	5.55	牙哈 23 - 1 - 2H	E	0.84	13.50
神木 1	K	0.85	18.16	牙哈 701	E	0.89	12.38
神木 2	K	0.80	19.43	牙哈 303	E + K	0.89	12.05

① 包建平,朱翠山,唐友军,等. 库车坳陷三叠 - 侏罗系源岩生油潜力评价[R]. 塔里木油田分公司,2003.

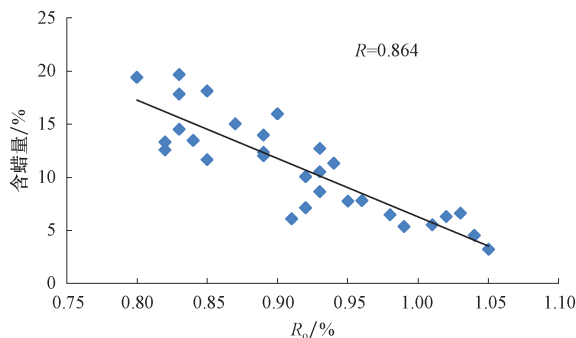


图2 库车坳陷原油成熟度与含蜡量关系

Fig. 2 Relationship between oil maturity and wax content of crudes in Kuqa Depression

类,造成凹陷中、南部高蜡油与正常油并存^[17]。库车坳陷原油总体表现为高蜡凝析油和轻质油的特征是因为原油是烃源岩处于成熟阶段而非高成熟阶段的产物,相对较低的热演化阶段使得库车坳陷原油中的蜡得以保存。

3.2 油气藏类型

库车坳陷内分布着大量的干气藏、凝析气藏及油藏,这些油气藏中的原油普遍都含蜡,依据油气藏类型、油气藏成藏期次、成藏过程、所处的构造带的不同,其原油含蜡量的高低不同。库车坳陷油气相态在克拉苏构造带中部以干气为主,以此为中心,向南、向西、向东渐变为凝析气藏和油藏,在平面上具有“内环干气、中环凝析气、外环油”的油气分布规律^[18]。库车坳陷原油含蜡量在克拉苏冲断带和依奇克里克冲断带上呈现低值(含蜡量<10%),在外围的乌什凹陷、提尔根

构造带、却勒-羊塔克构造带、喀拉玉儿滚构造带、英买7号构造带以及牙哈构造带上呈现高值(含蜡量>10%),平面上具有“北低南高、西高东低”的变化规律(图3)。这一变化规律与库车坳陷油气相态的分布规律具有良好的相关性,即气藏中原油含蜡量低,凝析气藏中原油含蜡量较高,油藏中原油含蜡量最高,并且随着油气藏生产气/油比(指初期稳定试采所取得的气/油比)的减小,原油含蜡量增加。个别油气藏因其成藏过程和成藏期次的特殊性导致其原油含蜡量会有差异。

1) 干气藏(原油含蜡量<5%)

库车坳陷中心克拉苏冲断带上烃源岩成熟度最高,克深5—克深2一线 R_o 大于2.0%,最高可达3.5%,克拉苏冲断带上的克深和克拉气藏都为干气藏。克深1、克深2气藏原油样品含蜡量介于3%~4.1%,平均含蜡量为3.57%,克拉2气藏原油样品含蜡量较高,介于2.7%~18.8%,平均含蜡量为8.39%(图4a)。克拉2气藏原油含蜡量之所以较高是由于早期成藏原油的少量残留,具有“早油晚气”的成藏特点(详见后文3.3)。除去克拉2气藏的特殊性,克深干气藏原油含蜡量都<5%。

2) 凝析油含量低的凝析气藏(5%<原油含蜡量<10%)

克拉苏冲断带的西部大北和博孜地区,以及依奇克里克冲断带上的迪那、迪北地区烃源岩成熟度为1.2%~2.0%,形成的油气藏类型均为凝析气藏,凝析油含量低,气/油比高,一般大于8 500 m³/m³。据凝析气PVT分析实验得到博孜1凝析气藏生产气/油比为9 565 m³/m³、大北凝析气田生产气/油比为68 068 m³/m³、迪北凝析

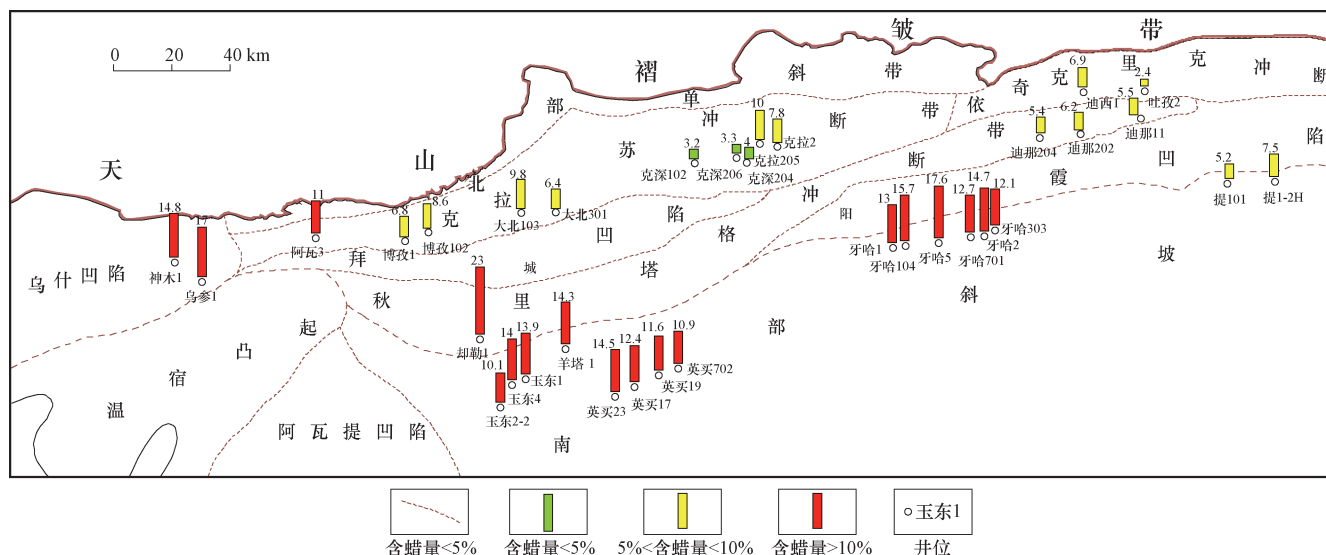


图3 库车坳陷原油含蜡量平面分布

Fig. 3 Planar distribution of wax content of crudes in Kuqa Depression

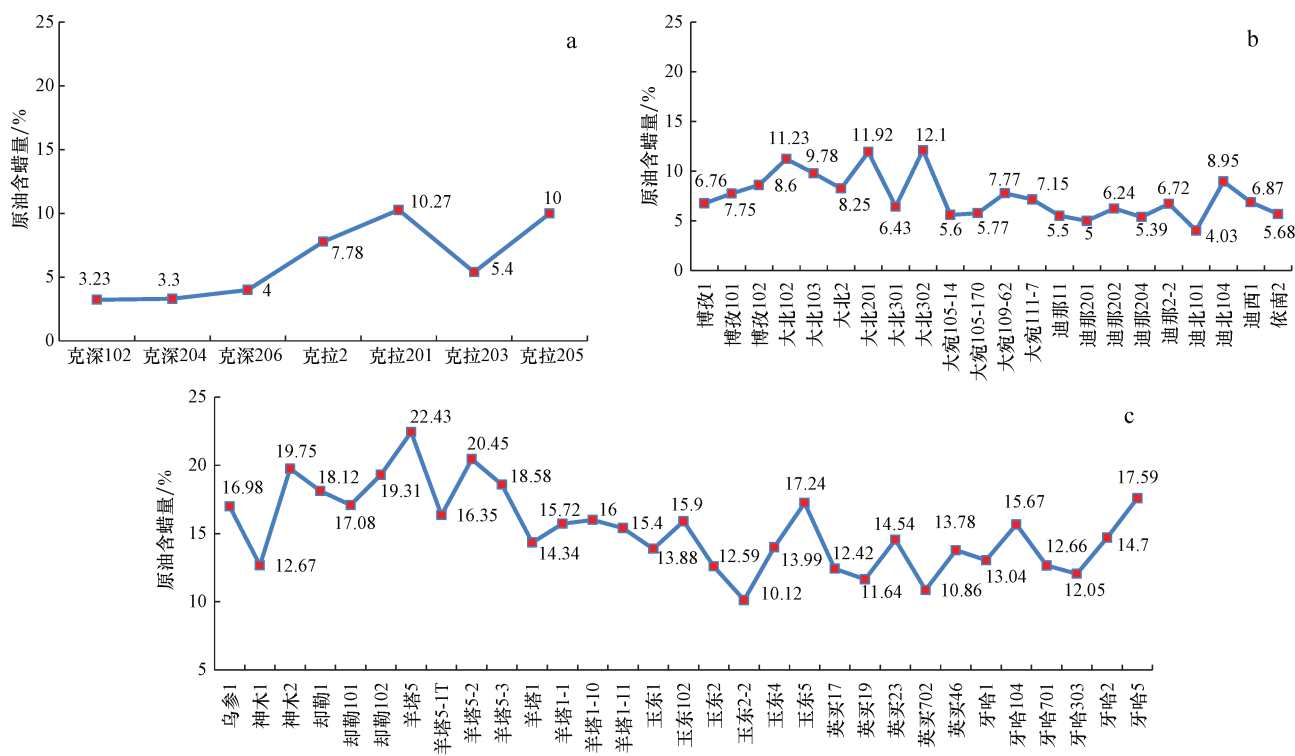


图4 库车坳陷干气藏(a)、凝析油含量低的凝析气藏(b)、凝析油含量高的凝析气藏(c)和油藏中原油含蜡量变化

Fig. 4 Variation of wax content of crudes in dry gas reservoirs(a), condensate gas reservoirs with low content of gas condensates(b), condensate gas with high content of gas condensates and oil reservoirs(c) in Kuqa Depression

气田生产气/油比为 $12\ 161\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、迪那凝析气田平均生产气/油比为 $10\ 577\text{ m}^3/\text{m}^3$, 这些凝析气藏中的原油样品含蜡量主要集中在 $5\% \sim 10\%$ (图4b)。位于大北附近的大宛齐, 现今油气藏类型之所以为油藏是由于大北盐下油气藏遭到穿盐大断裂破坏, 油气沿着断裂运移至盐上浅层而形成残留油藏。大宛齐凝析油藏原油样品含蜡量也主要集中分布于 $5\% \sim 10\%$ (图4b)。

3) 凝析油含量高的凝析气藏和油藏(原油含蜡量 $> 10\%$)

库车坳陷西端的乌什凹陷和南部的南部斜坡带上烃源岩成熟度低为 $0.6\% \sim 1.2\%$, 形成的油气藏类型为油藏和凝析油含量高的凝析气藏, 气/油比较低, 一般小于 $5\ 000\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。据凝析气 PVT 分析实验得到依拉克凝析气藏平均生产气/油比为 $1\ 083\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、牙哈油气田平均生产气/油比为 $1\ 511\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、英买力油气田平均生产气/油比为 $1\ 855\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、玉东2凝析气藏平均生产气/油比为 $3\ 983\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、羊塔5古近系凝析气藏平均生产气/油比为 $1\ 053\text{ m}^3/\text{m}^3$, 这些油气藏和神木1油藏、却勒1油藏、羊塔5白垩系油藏、玉东7油藏中原油样品含蜡量大都大于 10% (图4c)。南部斜坡带上的个别气藏如羊塔1凝析气藏(平均生产气/油比为 $8\ 970\text{ m}^3/\text{m}^3$)、羊塔2凝析气藏(平均

生产气/油比为 $18\ 399\text{ m}^3/\text{m}^3$), 是由于这两个气藏成因为下部的原生油气藏受断裂破坏发生调整在浅层形成的次生油气藏, 油气组分的垂向分异作用造成气/油比较高^[18-19]。

将凝析气 PVT 分析实验得到的各油气藏平均生产气/油比与其平均含蜡量数据(表1)进行相关性分析(图5a), 分析表明二者呈现良好的对数关系(相关系数 $R = 0.947\ 9$), 同时将单井生产气/油比与单井含蜡量之间做相关分析(图5b)也得到二者之间呈现良好的对数关系(相关系数 $R = 0.874\ 8$)。分析结果表明各油气藏的平均含蜡量及其中单井含蜡量都受生产气/油比的控制, 即原油含蜡量随生产气/油比对数的增加而减小。

3.3 气洗作用和原油运移作用

1) 受气洗作用影响

原油在遭受气洗(蒸发分馏)作用前后, 其化学组分必然会发生相应的变化, 最明显的变化主要反映在原油中轻组分的含量上, 浅层中经天然气气洗上来的原油中轻组分优势相当显著, 而经天然气气洗后残留下来的原油中轻组分的损失相当显著, 那么如何定量估算原油遭受气洗的程度呢? Kissin 曾指出, 未遭受气洗或其他改造作用的原油, 其正构烷烃的摩尔

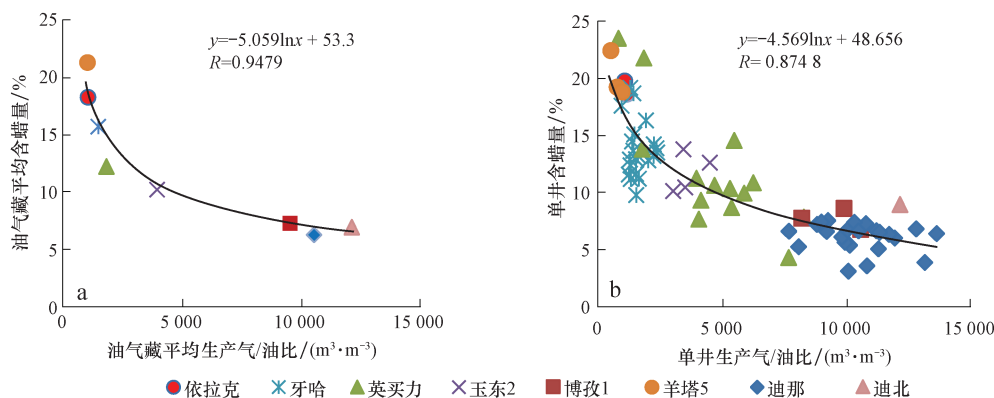


图5 库车坳陷各油气藏及单井生产气/油比与含蜡量关系

Fig. 5 Producing gas/oil ratio vs. wax content for different reservoir types and single wells in Kuqa Depression

a. 各油气藏平均生产气/油比与其平均含蜡量关系; b. 各油气藏中单井生产气/油比与其含蜡量关系

浓度与相应的碳数呈指数关系^[20],即:

$$y_i = c \times \exp(ax_i) \quad (2)$$

式中: y_i 代表正构烷烃的摩尔浓度, mol/L; x_i 代表正构烷烃的碳数, 个; a 和 c 为常数。两边取对数得:

$$\ln y_i = ax_i + \ln c \quad (3)$$

记 $\ln c = b$, 则:

$$\ln y_i = ax_i + b \quad (4)$$

Meulbroek 等^[21] 和 Losh 等^[22] 给出了定量估算原油遭受气洗程度的具体方法: ①借助全油色谱分析获得实际样品的各正构烷烃的质量, 将其转化为摩尔浓度后归一化, 得到 y_i , 将 y_i 取对数后作 $\ln y_i$ 与 x_i 的散点图, 如图 6 中的实际样品; ②将实际样品中成线性关系的点拟合出一条线性曲线, 记为 $\ln y'_i$ 与 x_i 的参考线, 该参考线与实际样品曲线的交点对应的碳数记为 x_B , B 值为 $\ln y_i$ 与 x_i 成线性关系的最小碳数。

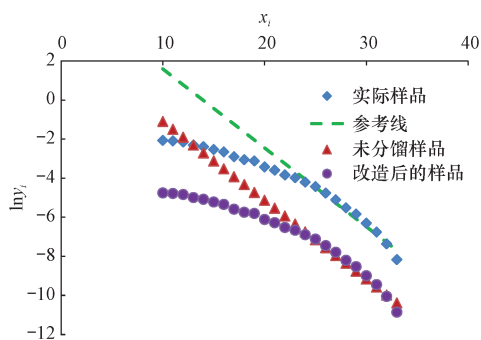


图6 库车坳陷原油正构烷烃摩尔浓度的对数与相应碳数的关系(以大北2井为例)

Fig. 6 Correlation between the logarithm of molar concentration of n-alkanes and the corresponding carbon number of crudes in Kuqa Depression (taking Well Dabe-2 as an example)

当 $i < B$ 时, $\ln y'_i > \ln y_i$; 当 $i \geq B$ 时, $\ln y'_i = \ln y_i$; ③ $y'_i = \exp(\ln y'_i)$, 由于 $\sum y'_i > 1$, 故将 y'_i 作归一化处理得 y'' , 使 $\sum y''_i = 1$, 将 y''_i 取对数后作 $\ln y''_i$ 与 x_i 的散点图, 得到未分馏样品曲线; ④参考线与未分馏样品曲线间差值记作 d , 将实际样品曲线的 $\ln y_i$ 减去 d , 记 $\ln y''_i = \ln y_i - d$, 得到改造后的样品曲线; ⑤ $y''_i = \exp(\ln y''_i)$, y''_i 即为改造后样品的正构烷烃摩尔浓度, 将其转换为质量记为 M'_i , 同时将未分馏样品曲线的正构烷烃摩尔浓度 y''_i 也转换为质量记为 M_i , 那么原油遭受气洗程度 (D) 用公式表达为:

$$D = (1 - \sum M'_i / \sum M_i) \times 100\% \quad (5)$$

大宛齐油藏位于大北凝析气藏的浅层, 油源对比分析发现大宛齐和大北的原油甾萜系列生物标志化合物具有相似的分布特征(图7): 三环萜烷中轻烃占主要优势, C_{20} 三环萜烷为主峰碳, 含量 $C_{19} + C_{20} + C_{21} \gg C_{23} + C_{24} + C_{25} + C_{26}$; C_{24} 四环萜烷含量高, 远大于 C_{26} 三环萜烷; $T_s > T_m$; γ -蜡烷含量高, 其含量与相邻的 C_{31} 22R 含量相差不大; C_{30} 重排藿烷含量高; C_{27} , C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷呈“V”字形, 且 C_{27} 规则甾烷含量最高; C_{27} 重排甾烷和 C_{29} 重排甾烷含量都比较高; 孕甾烷表现明显的优势。油源对比的结果表明大宛齐和大北地区的原油具有相同来源。

油源相同的条件下, 大北-大宛齐构造上的油和气的存在不同期的现象^[23]。大北古油气藏中早期生成的成熟油气被晚期形成的高成熟天然气充注, 油气沿着穿盐大断裂发生运移调整, 轻组分优先随气向上运移, 使得气洗上来的浅层油藏(也即大宛齐油藏)中富含轻组分, 而遭受气洗的深部油气藏(也即现今的大北凝析气藏)的残余油中则富含重组分。依据原油遭受气洗程度的定量估算方法, 大北原油遭受气洗程度高, 大多大于 60%, 最高甚至高达 97%, 而大宛齐原油正

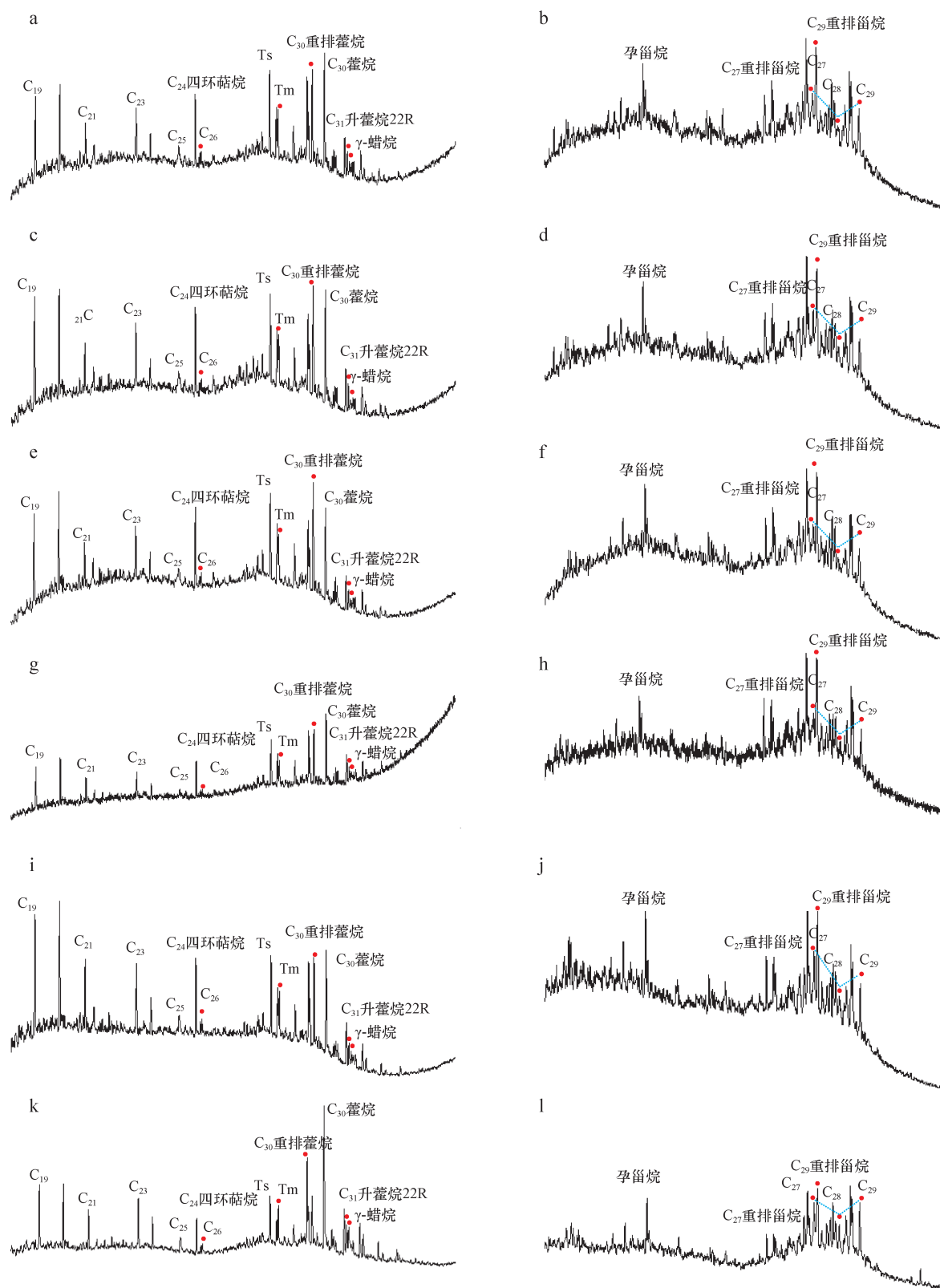


图7 库车坳陷大北和大宛齐地区部分原油甾萜生物标志化合物分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of steroid and terpenoid biomarkers in some crude samples from Dabei and Dawanqi areas, Kuqa Depression

a, b. 大宛130井, 埋深1 030.5~1 485 m, N_j^1 ; c, d. 大宛110~12井, 埋深103.5~810 m, N_j^1 ; e, f. 大宛105井, 埋深622~675 m, N_j^1 ; g, h. 大北102井, 埋深5 315~5 479 m, K; i, j. 大北2井, 埋深5 541~5 593 m, K; k, l. 大北202井, 埋深5 711~5 845 m, K

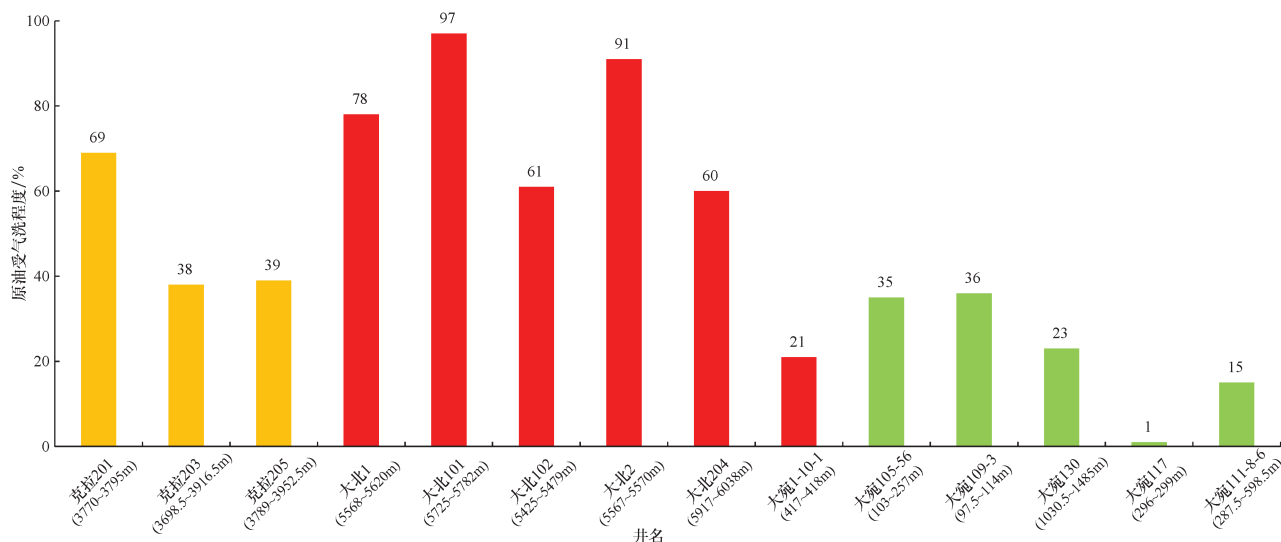


图8 库车坳陷克拉2、大北和大宛齐地区部分原油气洗程度对比

Fig. 8 Comparison of gas-washing degree of some crudes in Kela-2, Dabei and Dawanqi areas, Kuqa Depression

构烷烃损失程度低,一般为20%~40%,部分井的原油甚至不存在轻组分的损失(图8)。相应的大北原油平均含蜡量为10.06%,大宛齐原油平均含蜡量为6.93%,表明油气藏中原油的含蜡量受气洗程度的影响。这一结论在克拉2干气藏中也有表现。

克拉2为一干气藏,按照库车坳陷原油含蜡量受原油所属油气藏类型控制这一结论,克拉2气藏中的原油含蜡量应该小于5%,然而其含蜡量都高于5%,平均含蜡量也是8.4%,这是由于克拉2气藏的形成与大北气藏的形成类似,都具有“早油晚气”的特点^[24]。克拉2在燕山末期为一古隆起,中新世康村组沉积前聚集了三叠系烃源岩生成的早期原油,喜马拉雅运动中期构造运动弱,在盐下形成了一些逆冲推覆构造,三叠系、侏罗系烃源岩生成的成熟油和高成熟天然气随着断层运移充注到早期油藏中,使早期古隆起中的油藏发生油气的混合调整,喜马拉雅运动晚期构造运动强烈,在盐下形成了一些断背斜圈闭,并且在克拉2圈闭之上发育一些穿盐大断裂沟通盐上盐下地层,使得克拉2圈闭中的油气部分散逸。克拉2气藏油、气充注不同步,晚期大量天然气的充注加之强烈的构造运动,使得克拉2古油藏中早期的原油遭受强烈的气洗,气洗程度为38%~69%(图7)。由于轻组分的正构烷烃在天然气中的溶解程度远大于重组分的芳烃、蜡质、沥青质等,因此在遭受气洗作用后残留的原油中蜡质组分含量高。张斌等^[25]也通过正构烷烃损失的定量计算证实大北凝析气藏和克拉2气藏在形成的过程中都遭受了强烈的气洗作用,并且对原油成分

造成较大影响。

与克拉2气藏相邻的克深1、2气藏的形成过程相对简单,克深1、克深2圈闭是在喜马拉雅运动晚期形成,而三叠系、侏罗系烃源岩自新近纪以来一直处于生气高峰,因此克深1、2圈闭中聚集了大量的天然气以及少量的原油,没有发生气洗作用,并且其中的原油成熟度高,依据包建平^①等的库车坳陷原油成熟度计算公式估算的克深102原油 R_o 为1.05%,故克深气藏中原油含蜡量较克拉气藏中低的多。

2) 受原油运移作用影响

前人的大量研究表明,原油中含氮化合物特别是中性吡咯类含氮化合物的分布特征和浓度变化可以有效的指示油气的运移,但其分布特征和浓度变化不仅与原油的运移距离有关,还与原油的成熟度、成因类型等有关^[26-28]。目前原油的成熟度对其中吡咯类含氮化合物的影响还不清楚。具有相同成因类型的原油,也即具有相同油源特征的原油,其原油中吡咯类含氮化合物也具有相似的分布特征。因此,在利用原油中吡咯类含氮化合物作为原油运移的指标时,必须要求其原油样品来自相同的油源。在相同的油源条件下,随着原油运移距离的增加,吡咯类含氮化合物丰度显著降低。由于吡咯类含氮化合物约占总含氮化合物的75%~80%^[29],因此原油中吡咯类含氮化合物的浓度变化可以反映原油中总含氮化合物浓度变化,反之,原油中总含氮化合物浓度变化也可以反映吡咯类含氮化合物的浓度变化。那么原油中总含氮化合物浓度变化趋势也可以反映原油的运移方向。

① 包建平,朱翠山,唐友军,等. 库车坳陷三叠-侏罗系源岩生油潜力评价[R]. 塔里木油田分公司,2003.

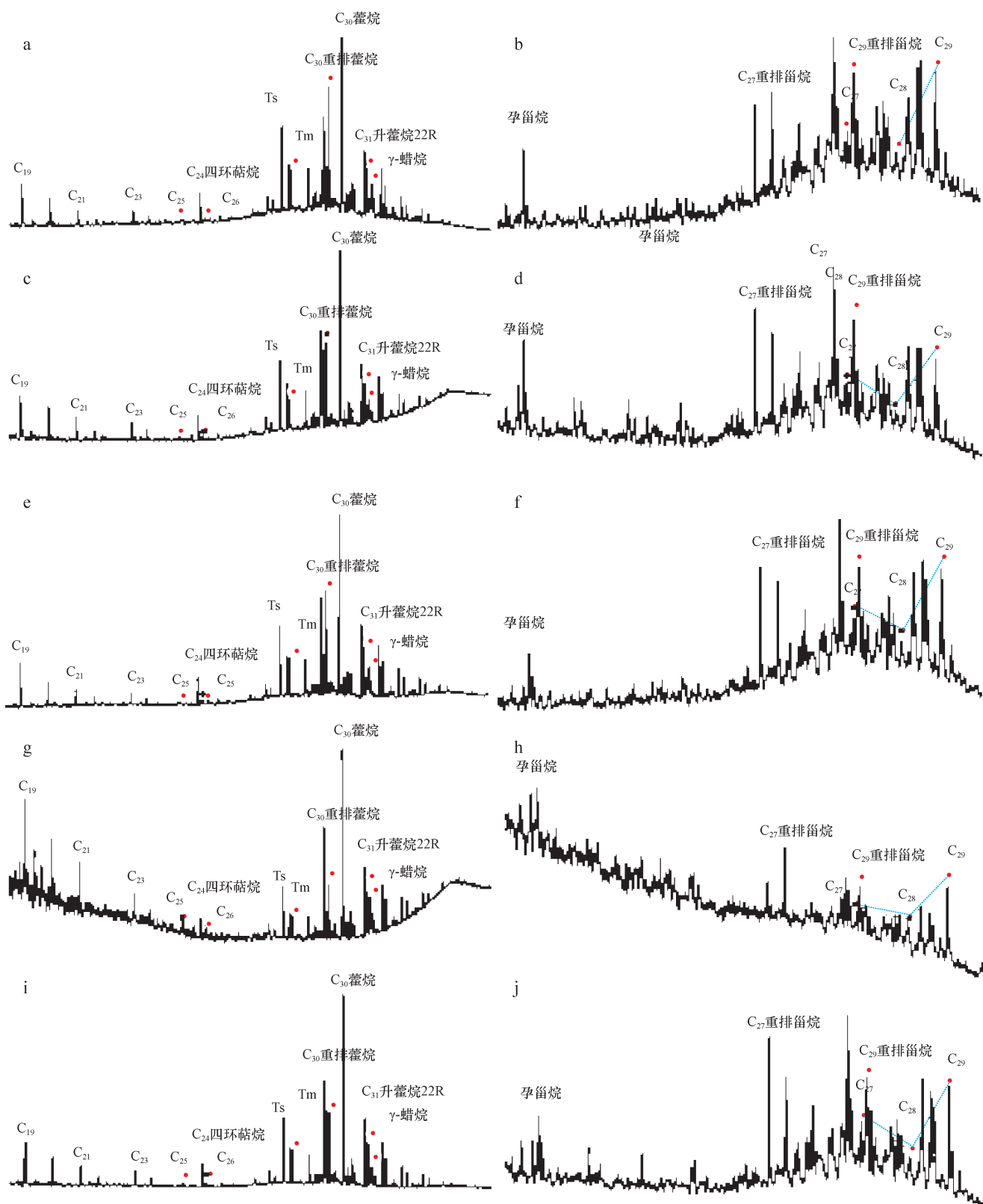


图9 库车坳陷却勒1、羊塔克和玉东2地区部分原油甾、萜生物标志化合物分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of steroid and terpenoid biomarkers in some crude samples from in Quele-1, Yangtake and Yudong-2 areas, Kuqa Depression

a, b. 却勒1井,埋深5 755 ~ 5 777 m, E; c, d. 羊塔101井,埋深5 350.1 ~ 5 355.5 m, E; e, f. 羊塔5井,埋深5 323 ~ 5 325 m, E;
g, h. 羊塔2井,埋深5 387 ~ 5 390 m, K; i, j. 玉东2井,埋深4 728.81 ~ 4 744.88 m, E

却勒1、羊塔克和玉东2构造上位于库车坳陷前缘隆起带的西侧,其中却勒1井所产原油为正常原油,而羊塔克和玉东2构造上所产原油大多属于轻质油或凝析油。原油地球化学特征的研究结果表明,这些原油具有相似的生物标志物分布与组成(图9):三环萜烷中轻烃占主要优势, C_{19} 三环萜烷为主峰碳,含量 $C_{19} + C_{20} + C_{21} \gg C_{23} + C_{24} + C_{25} + C_{26}$; C_{24} 四环萜烷含量高,远大于 C_{26} 三环萜烷; $Ts > Tm$; γ -蜡烷含量低,其含量小于或等于相邻的 C_{31} 升藿烷22R含量的一半; C_{30} 重排藿烷含量高; C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷呈“V”字形,且 C_{29} 规则甾烷含量最高; C_{27} 重排甾烷和 C_{29} 重排甾烷含量都高;孕甾烷表现明显的优势,显示出它们具有相同油源。

据包建平^①研究报告中含氮化合物定量分析结果表明,却勒1、羊塔克和玉东2构造上原油含氮化合物的浓度的变化具有一定的规律性,如却勒1井古近系原油中含氮化合物的浓度较高,约为8.36 $\mu\text{g/g}$ 油;羊塔克构造上位于构造西端的羊塔5井古近系原油中含氮化合物浓度较高,一般介于7.70 ~ 8.22 $\mu\text{g/g}$ 油之间,位于构造中端的羊塔101井白垩系原油中含氮化合物的浓度中等,一般为1.0 ~ 2.2 $\mu\text{g/g}$ 油之间,而位于构造东端的羊塔2井白垩系原油中含氮化合物的浓度最低,约为0.20 $\mu\text{g/g}$;位于喀拉玉尔滚构造带南端的玉东2构造上古近系原油中含氮化合物的浓度也较低,一般介于0.47 ~ 0.62 $\mu\text{g/g}$,这些数据表明这些原油中的含氮化合物的浓度已经发生了明显的变化,下降幅度可能在一个数量级左右,表明它们经历了较长距离的运移,并发生了明显的分异作用。而这些构造上原油中含氮化合物的浓度出现的自北向南,自西向东的规律性下降趋势,表明了该构造带上原油运移的方向(图10)。从图10中可以明显看到,沿着原油运移方向,原油含蜡量也表现出明显的下降趋势。

卢鸿等^[8]对千米桥潜山构造高蜡凝析油成因机理的研究成果也表明原油含蜡量的分布受运移过程中的“地色层效应”控制,随原油运移距离的增加含蜡量逐渐降低。“地色层效应”理论是指,极性强的分子量化合物容易被矿物或固体表面吸附,在运移过程中,极性强的分子量化合物相比于极性弱的低分子量化合物运移的更慢。因此越靠近烃源岩的方向,原油中高分子量正构烷烃含量越高,从而原油含蜡量越高。原油中吡咯类含氮化合物的分布与浓度变化可以指示原油的运移方向也是受“地色层效应”的控制。

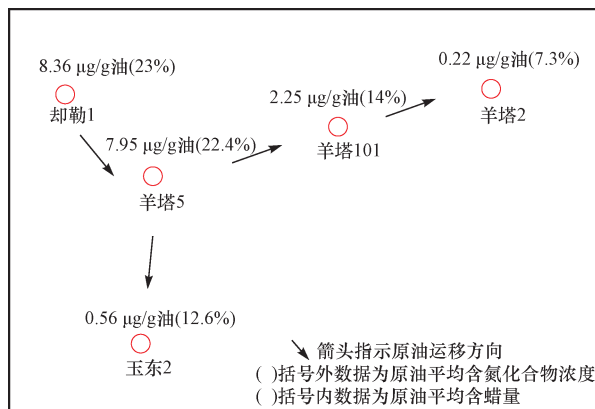


图10 库车坳陷却勒1、羊塔克和玉东2构造上原油中含氮化合物浓度变化指示原油运移方向^①

Fig. 10 Variation of nitrogenous compound concentration in crudes indicates the direction of oil migration in Quele-1, Yangtake and Yudong-2 areas, Kuqa Depression^①

原油成熟度、油气藏类型、气洗作用和原油运移作用三个因素共同控制了库车坳陷原油含蜡量大小,其中原油成熟度是最主要的控制因素,库车坳陷原油是烃源岩在成熟阶段下热演化生成的成熟原油,其中的蜡质成分得以保存,总体表现为高含蜡的特征;油气藏类型为次要的控制因素,干气藏中原油含蜡量低(<5%),凝析油含量低的凝析气藏中原油含蜡量较高(介于5% ~ 10%),凝析油含量高的凝析气藏和油藏中原油含蜡量最高(>10%),具体表现为各油气藏的平均含蜡量及其中单井含蜡量都受生产气/油比的控制,与生产气/油比之间呈良好的对数关系;气洗作用和原油运移作用对库车坳陷原油含蜡量的影响最小,该因素仅对个别特殊油气藏或油源条件相同的油气藏中一些单井含蜡量变化起作用,例如大宛齐油藏是大北古油气藏经气洗作用而形成的浅层油藏,其原油平均含蜡量小于大北凝析气藏。同样特殊的还有克拉2干气藏,因其形成具有“早油晚气”的特点,使得克拉2干气藏原油平均含蜡量及其中单井的含蜡量都高于5%。却勒1井、羊塔5井、羊塔101井、羊塔2井和玉东2井原油具有相同的油源,其单井含蜡量都大于10%,因原油运移作用使得各单井含蜡量之间存在差异。

4 结论

1) 大量的原油分析数据得出库车坳陷原油总体

① 包建平,朱翠山,唐友军,等. 库车坳陷油气运移特征研究[R]. 塔里木油田分公司,2004

上表现为高蜡凝析油和轻质油的特征,具有低密度、低粘度、胶质和沥青质含量低、高凝固点、中-高含蜡的特点,饱和烃含量最高,平均在70%以上,芳烃次之,非烃和沥青质含量少,碳数分布以轻烃为主,主峰碳以10~14居多。构造位置上主要分布在库车坳陷南部斜坡带、西部乌什凹陷和东部依奇克里克冲断带上。随着原油含蜡量的增加,原油中饱和烃含量降低,芳烃和非烃含量增加,主峰碳数、原油的粘度和凝点都呈增加的趋势。

2) 库车坳陷三叠系、侏罗系烃源岩有机显微组分组成决定了高蜡凝析油和轻质油的形成。烃源岩有机显微组分以镜质组为主,惰质组次之,壳质组以孢子体和角质体为主。高蜡油部分是由壳质组中的孢子体、角质体和腐泥组中的藻类体生成,凝析油和轻质油部分是由镜质组生成。壳质组、腐泥组中的藻类体和镜质组三者是库车坳陷高蜡凝析油和轻质油形成的物质基础,三者具有相当的活化能又是库车坳陷高蜡凝析油和轻质油形成的化学条件。

3) 库车坳陷原油含蜡量主要受3个因素的控制:原油成熟度、油气藏类型、气洗作用和原油运移作用。其中原油成熟度是最主要的控制因素,油气藏类型为次要的控制因素,气洗作用和原油运移作用对库车坳陷原油含蜡量的影响最小。

参 考 文 献

- [1] 陈建渝. 凝析油的多种成因概述[J]. 地质科技情报, 1987, 6(3): 95-100.
Chen Jianyu. A summary of various causes of condensate[J]. Geological Science and Technology Information, 1987, 6(3): 95-100.
- [2] 杨永才, 张枝焕. 高蜡凝析油或轻质油的分布特征与成因机理[J]. 地质科技情报, 2005, 24(3): 55-59.
Yang Yongcai, Zhang Zhihuan. Occurrence and original mechanisms of high waxy condensates or light crude oils[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(3): 55-59.
- [3] 陈大钧. 油气田应用化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 308-310.
Chen Dajun. Oilfield applied chemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 308-310.
- [4] 王铁冠, 朱丹, 卢鸿, 等. 千米桥古潜山高蜡凝析油的高分子量(C_{35+})正烷烃分布及其烃源灶方位[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(5): 401-410.
Wang Tieguan, Zhu Dan, Lu Hong, et al. High molecular weight (C_{35+}) n-alkane distribution and hydrocarbon kitchen orientation of high wax condensate in Qianmiqiao Buried-hill[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(5): 401-410.
- [5] 黄第藩, 赵孟军. 下古生界海相原油之中蜡的成因分析—干酪根PY-GC分析提供的证据[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 12-20.
Huang Difan, Zhao Mengjun. The genesis of marine oils with middle wax from lower Palaeozoic-evidences obtaining from kerogen's py-gc analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 12-20.
- [6] 韩霞, 田世澄, 张占文. 高蜡油成因及其形成聚集的地球化学效应[J]. 地质科技情报, 2007, 26(5): 73-78.
Han Xia, Tian Shicheng, Zhang Zhanwen. Dynamics processes and geochemistry effects for the formation and accumulation of high-wax oils[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(5): 73-78.
- [7] 吕慧, 陈致琳, 王忠, 等. 济阳坳陷东营凹陷南斜坡高蜡原油高分子量烃类分布及高蜡成因[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 355-360.
Lv Hui, Chen Zhilin, Wang Zhong, et al. Distribution of high molecular weight hydrocarbons and genesis of high wax content oil from the south slope zone of the Dongying Sag the Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 355-360.
- [8] 卢鸿, 王铁冠, 王春江, 等. 千米桥潜山构造高蜡凝析油气藏的蜡质来源研究[J]. 地质地球化学, 2003, 31(1): 1-9.
Lu Hong, Wang Tieguan, Wang Chunjiang, et al. Wax source analysis of highly waxy condensate oil and gas pool in Qianmiqiao Buried-hill Zone, Huanghua Depression [J]. Geology-Geochemistry, 2003, 31(1): 1-9.
- [9] 张枝焕, 黄志龙, 张振英, 等. 吐哈盆地西部地区高蜡凝析油和轻质油的地球化学特征及成因分析[J]. 地质学报, 2004, (4): 551-559.
Zhang Zhihuan, Huang Zhilong, Zhang Zhenying, et al. Geochemical characteristics and origin of high-wax condensate and high-gravity oil in the western Turpan-Hami Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, (4): 551-559.
- [10] 郭小文, 刘可禹, 宋岩, 等. 库车坳陷克拉2气田油气充注和超压对储层孔隙的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 935-943.
Guo Xiaowen, Liu Keyu, Song Yan, et al. Influences of hydrocarbon charging and overpressure on reservoir porosity in Kela-2 gas field of the Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 935-943.
- [11] Brooks J D, Smith J W. The diagenesis of plant lipids during the formation of coal, petroleum and natural gas-II. Coalification and the formation of oil and gas in the Gippsland Basin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, 33(10): 1183-1194.
- [12] Tegelaar E W, Mattheij R M, Jansen J B H, et al. Possible origin of n-alkanes in high wax crude oils[J]. Nature, 1989, 342: 529-531.
- [13] 黄第藩, 李晋超, 周翥红, 等. 陆相有机质演化与成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
Huang Difan, Li Jinchao, Zhou Zhuhong, et al. Evolution and hydrocarbon formation mechanism of terrestrial organic matter[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [14] 黄海平, 郑亚斌, 张占文, 等. 低等水生生物: 高蜡油形成的重要来源[J]. 科学通报, 2003, 48(10): 1092-1098.
HuangHaiping, Zheng Yabin, Zhang Zhanwen, et al. Low aquatic organisms: an important source of high wax oil formation[J]. Chinese

- Science Bulletin, 2003, 48(10): 1092 – 1098.
- [15] 王飞宇,郝石生,何萍,等. 泌阳凹陷湖相藻类体中藻质素作为高蜡油母质[J]. 科学通报, 1997, 42(11): 1193 – 1196.
Wang Feiyu, Hao Shisheng, He Ping, et al. Lacustrine algae-endothelin is as a parent material of high wax oil in Biyang Sag[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(11): 1193 – 1196.
- [16] 崔景伟,王铁冠,胡健,等. 塔里木盆地和田河气田轻质油成熟度判定及其油源意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 27 – 36.
Cui Jingwei, Wang Tieguan, Hu Jian, et al. Maturity of light oil and its significance in indicating oil source in Hetianhe gas field, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 27 – 36.
- [17] 黄海平,李虹,马刊创,等. 大民屯凹陷高蜡油的形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 64 – 67.
Huang Haiping, Li Hong, Ma Kanchuang, et al. Formation condition of high wax oils in Damintun Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 64 – 67.
- [18] 赵孟军,鲁雪松,卓勤功,等. 库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 395 – 404.
Zhao Mengjun, Lu Xuesong, Zhuo Qingong, et al. Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa Foreland Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 395 – 404.
- [19] Chen Ling, Zhu Guangyou, Zhang Bin, et al. Control factors and diversities of phase state of oil and gas pools in the Kuqa petroleum system[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 484 – 496.
- [20] Kissin Y. Catagenesis and composition of petroleum: origin of n-alkanes and isoalkanes in petroleum crudes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(9): 2445 – 2457.
- [21] Meulbroek P. Equations of state in exploration[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(6): 613 – 634.
- [22] Losh S, Cathles L, Meulbroek P. Gas washing of oil along a regional transect offshore Louisiana[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(6): 655 – 663.
- [23] 卓勤功,赵孟军,谢会文,等. 库车前陆盆地大北地区储层沥青与油气运聚关系[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 193 – 196.
Zhuo Qingong, Zhao Mengjun, Xie Huiwen, et al. Relationship between reservoir bitumen and hydrocarbon migration in Dabei region, Kuqa Foreland Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2): 193 – 196.
- [24] 鲁雪松,刘可禹,卓勤功,等. 库车克拉2气田多期油气充注的古流体证据[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 537 – 544.
Lu Xuesong, Liu Keyu, Zhuo Qingong, et al. Palaeo-fluid evidence for the multi-stage hydrocarbon charges in Kela-2 gas field, Kuqa Foreland Basin, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 537 – 544.
- [25] 张斌,黄凌,吴英,等. 强烈气洗作用导致原油成分变化的定量计算:以库车坳陷天然气藏为例[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 270 – 279.
Zhang Bin, Huang Ling, Wu Ying, et al. Quantitative evaluation of crude oil composition change caused by strong gas washing: a case study of natural gas pool in Kuqa Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 270 – 279.
- [26] 张明峰,妥进才,郭力军,等. 应用含氮化合物探讨柴达木盆地乌南地区原油运移[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 727 – 731.
Zhang Mingfeng, Tuo Jincai, Guo Lijun, et al. A discussion on petroleum migration in the Wunan oilfield of Qaidam Basin based on nitrogen compounds[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 727 – 731.
- [27] 刘洛夫,康永尚. 运用原油吡咯类含氮化合物研究塔里木盆地塔中地区石油的二次运移[J]. 地球化学, 1998, 27(5): 476 – 482.
Liu Luofu, Kang Yongshang. Investigation on secondary migration of oils in central Tarim, Tarim Basin using pyrrolic nitrogen compounds[J]. Geochimica, 1998, 27(5): 476 – 482.
- [28] 倪春华,包建平,张宝,等. 吡咯类化合物及其在油气运移中的应用[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 428 – 431.
Ni Chunhua, Bao Jianping, Zhang Bao, et al. Pyrrolic compounds and application in hydrocarbon migration[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(4): 428 – 431.
- [29] 李素梅,王铁冠,张爱云. 地质体中的有机氮化合物及其在油藏地球化学中的应用[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 100 – 107.
Li Sumei, Wang Tieguan, Zhang Aiyun. Characteristics of organonitrogen compounds in geologic bodies and their application in oil reservoir geochemistry[J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(1): 100 – 107.

(编辑 张亚雄)