

芳烃参数重建原油成熟度及其在哈山地区的应用

郭瑞超¹, 隋风贵², 曾治平¹, 王超¹

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院西部分院, 山东 东营 257000;

2. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000)

摘要: 原油成熟度由于不能采用实验方法直接测定, 多利用生标物参数进行判识。常用的生标物成熟度参数多为定性分析, 且不适用于高成熟阶段的原油样品。以低热演化程度的烃源岩样品为研究对象, 通过进行高温热模拟实验, 分析了不同热演化阶段下液态烃产物的芳烃特征, 探讨各芳烃参数与实测热成熟度的关系。结果显示, 甲基菲、三甲基萘等参数与热成熟度具有较好的相关性, 据此建立了各参数与热成熟度的拟合公式; 并对哈山地区油砂样品进行了成熟度判识, 其中二叠系、三叠系和侏罗系原油成熟度较低, 白垩系原油成熟度较高。

关键词: 芳烃参数; 原油成熟度; 甲基菲参数; 哈拉阿拉特山地区

中图分类号: TE122.1+13

文献标识码: A

Aromatic parameter reconstruction of crude oil maturity and its application in Hala' alate area

Guo Ruichao¹, Sui Fenggui², Zeng Zhiping¹, Wang Chao¹

(1. West Branch of Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China; 2. SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: As no experimental method can be adopted to directly measure crude oil maturity, biomarker parameters are usually used as proxies. Common biomarker parameters are mostly applied to make a qualitative analyses, but they may not be applicable to measure high maturity crude oil. High temperature thermal simulation experiments were conducted on low maturity source rock samples to analyze features of liquid aromatic products at different stages of thermal evolution. The relationship between various aromatic parameters and thermal maturity was explored. Experimental results showed that methylphenanthrene and trimethyl naphthalene have significant correlations with thermal maturity. On this basis, some equations for extrapolating various parameters to thermal maturity were established. Thermal maturity of oil sand samples from the Hala' alate area was determined and showed that the Permian, Triassic, and Jurassic crude oil has a lower maturity, while the Cretaceous crude oil has a high maturity.

Key words: aromatic parameter; crude oil maturity; methylphenanthrene parameter; Hala' alate area

芳烃化合物是烃源岩、原油、煤以及现代沉积物中含量仅次于饱和烃的重要有机族组分, 一般占总烃的 10% ~ 45%, 含有丰富的地质与地化信息^[1-2]。热成熟度指沉积有机质向石油转化的热驱动反应程度。评价源岩成熟度的常规参数包括镜质体反射率、热变指数、碳优势指数、岩石热解等参数, 但是均不适用于评价石油的成熟度^[3-4]。原油成熟度是指烃源岩中干酪根产生该部分液态烃类时的热演化程度, 多采用生标物参数法定性判识^[5-7]。其中可用于指示原油成熟度的生物标志

化合物参数较多, 常用的甾烷 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 与 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 等参数只适用于生油高峰前的演化阶段, 最高仅能反映成熟度约 0.9% ~ 1.0% 的范围, 因而其应用存在局限性。Mango 提出了轻烃温度参数及其与成熟度的相关模型^[8]; 金刚烷类化合物也具有较好的成熟度指示意义, 但均适用于轻质油、凝析油或低降解程度的原油。Connan 认为, 烷基苯极易受到细菌破坏, 而芳烃馏分中的烷基萘、菲、蒽等族化合物则不易破坏^[9]。由于芳烃具有不同取代基位置的同一类化合物存在热稳

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-07-07。

作者简介: 郭瑞超(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 从事成烃成藏与资源评价研究工作。E-mail: guoruichao@sina.com。

基金项目: 国家“十三五”重大科技专项“准噶尔盆地碎屑岩层系油气富集规律与勘探评价”(2016ZX05002-002)与博士后课题“准噶尔盆地二叠系不同类型构造单元烃源岩成烃演化过程及模式”基金(YKB1403)资助。

定性差异,且在生物降解过程中受到的影响较小,适用于成熟、高成熟热演化阶段产物的识别,因而可广泛用于判别原油成熟度^[10]。本文主要以哈拉阿拉特山(下称哈山)下二叠统风城组(P_1f)低熟烃源岩为样本,通过高温热模拟实验分析其不同热演化阶段下液态烃产物的芳烃特征,建立芳烃参数与热成熟度的相关性,为该地区原油成熟度研究提供借鉴。

1 地质背景

哈山位于准噶尔盆地西北缘,南临玛湖凹陷乌夏含油气区,北与和什托洛盖盆地相接,构造上处于哈山逆冲推覆走滑构造带前缘,整体上呈NE—SW向展布。该地区构造作用复杂,平面上自南向北划分为后翼走滑带、逆冲推覆叠加变形带、前缘冲断带和前缘超剥带。剖面上划分为逆冲推覆系统与准原地叠加系统上下2套地层结构。中国石化接手该区块研究工作后,开展了三维地震与探井部署工作,在三叠、侏罗、白垩系等层系均见不同程度的油气显示,在逆冲推覆构造带的哈浅6井等钻遇 P_1f 烃源岩,并于2011年和2012年相继发现了春晖油田和阿拉德油田,实现了哈山地区含油气规模的重大拓展。该区已发现的原油多经历了不同程度的生物降解,根据前期油气源对比分析,其油气来源均来自于下二叠统风城组烃源岩。由于构造演化复杂,原油可能存在玛湖凹陷的远源贡献或哈山准原地系统烃源岩近距离贡献。

2 样品与实验分析条件

2.1 样品

本文以准噶尔盆地西北缘哈山地区HQ6井 P_1f 深灰色泥岩为高温高压模拟实验样品,据胜利油田分公司勘探开发研究院测定,样品TOC含量为1.59%,有机质类型为II₁型, $R_o=0.71\%$ 。采集了哈山地区原油与油砂样品13样次;二叠系烃源岩样品6样次,岩性为深灰色泥岩、云质泥岩。

2.2 分析方法

采用胜利油田分公司勘探开发研究院的囊式釜高温高压生排烃模拟装置,针对源岩样品进行高温生烃模拟实验。将该样品粉碎后分成8等份,放置于高压釜内,以水/岩比为5:1的石英砂充填在样品周围,密封高压釜并抽真空。由室温开始,对其分别以50℃/h的升温速率分别加热至250、300、325、350、375、400、450℃,共7个温度点,恒温72h,实验中不施任何压力。对各终点温度产物

进行收集,固体残渣用氯仿抽提,抽提后残余物进行干酪根处理与镜质体反射率测试,对液态产物进行芳烃色谱分析。

对哈山地区油砂的抽提物与原油进行芳烃色谱质谱分析。对源岩进行干酪根处理并测定镜质体反射率,测试仪器为MSP400显微荧光光谱仪;同时进行源岩氯仿沥青抽提物的芳烃色谱质谱分析。

GC-MS分析:采用HP6890色谱仪和5973MSD台式质谱仪;色谱柱为DB5-MS(60m×0.25mm×0.25μm);升温程序设计为:柱始温80℃,升温速率3℃/min,柱终温300℃,恒温30min;进样气温度310℃;柱前压为170kPa,分流比为20:1;载气为氦气,线速为30cm/s;检测方式为全扫描。

3 分析结果及讨论

3.1 热模拟实验结果分析

3.1.1 不同热模拟温度条件源岩产物的热演化特征

针对高温生烃模拟实验的7个温度点的反应产物,进行干酪根处理后分析镜质体反射率,测点数均在20以上,离差小于0.1。 $R_o=0.7\% \sim 2.5\%$,与实验温度相关性如图1所示。

3.1.2 不同热演化阶段烷烃色谱质谱特征

实验结果烷烃色谱分析显示,随着热演化程度的增加,饱和烃色谱中碳数范围逐渐增加,峰形由前峰型转变为后峰型,主峰碳数由 C_{17} 向后过渡为 C_{29} ,碳优势指数(CPI)逐渐增加,由初始值0.92增加至1.1后(对应 R_o 达到0.99%),表现为稳定区间内分布(图2a);奇偶优势指数(OEP)变化趋势与CPI基本一致,随热演化程度增加而逐渐失去奇偶优势,数值变化幅度较小,这是由于从干酪根裂解生成的正构烷烃不具有奇偶优势,从而掩盖早期的优势特征。姥植比与演化程度无明显相关性,由植烷优势过渡为姥鲛烷优势,在 R_o 为1.0%~1.3%的成熟

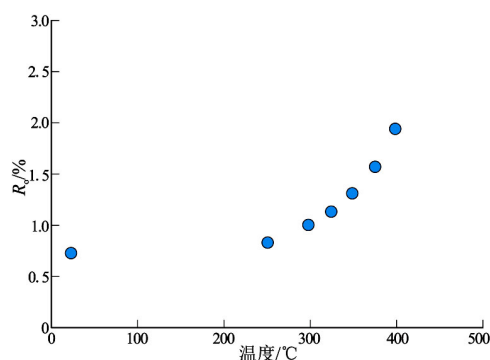


图1 不同温度条件下源岩的实测镜质体反射率

Fig. 1 Vitrinite reflectance of source rocks at different temperatures

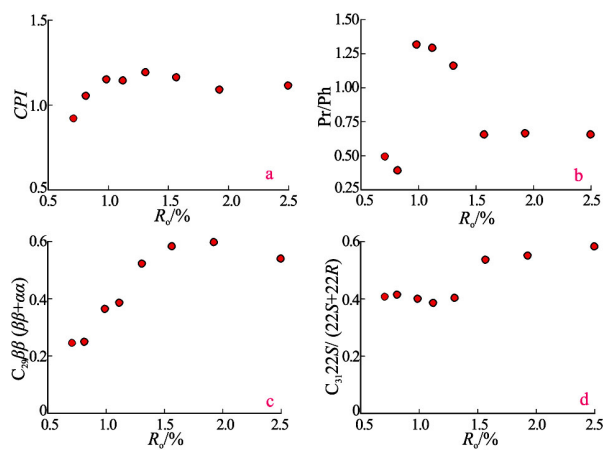


图 2 不同演化阶段饱和烃色谱特征
Fig.2 Chromatographic characteristics of saturated hydrocarbons in different evolution stages

阶段达到高值,随后稳定在 0.65 左右(图 2b)。

质谱分析结果显示,孕甾烷、升孕甾烷及重排甾烷在低演化程度时,相对丰度均较低,随演化程度增加,相对丰度逐渐升高;规则甾烷中,常用的 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 与热演化程度表现为明显正相关关系,并在 R_o 为 1.0%~1.5% 的成熟阶段达到 0.5 以上,随后渐趋稳定(图 2c)。萜烷中三环萜烷含量随演化程度增加而逐渐增加,五环萜烷相对丰度则逐渐降低, C_{30} 藿烷受影响较明显,相对丰度由 28.67% 降低至 17.8%,伽马蜡烷趋势与 C_{30} 藿烷较为一致;升藿烷 $C_{31}22S/(22R+22S)$ 常用于分析成熟度,该值随成熟度演化程度增加而增加,在成熟阶段达到 0.55 左右的稳定值(图 2d)。

3.1.3 不同热演化阶段芳烃色谱与参数特征

生油岩及其产物的芳烃色谱特征受到热演化阶段的影响较大^[11]。初始烃源岩样品($R_o=0.71\%$)的芳烃色谱表现为典型的后峰型分布,四环、五环化合物占优势;以多羟基维生素 E(DHVE)为主峰,由于 DHVE 热稳定性极差,且极易被氧化成醌,其含量高显示了该源岩样品形成于咸化强还原的沉

积环境^[12]; γ -DHVE 含量显著高于 β -DHVE,表现为典型低成熟烃源岩特征。在 250℃ ($R_o=0.82\%$) 的产物中,芳烃色谱转变为双峰型,富含多环芳烃化合物和芳香甾烷系列; DHVE 含量显著降低, β -DHVE 含量显著高于 γ -DHVE。随着热演化程度增加,芳烃色谱分布逐渐向前峰型转变,菲和烷基菲峰群化合物含量较高,芳香甾烷类化合物含量逐渐降低,萘和烷基萘峰群的含量逐渐增加;其中,在 $R_o>0.92\%$ 的样品中, DHVE 化合物已极微或完全消失。

芳烃中最常用于衡量原油成熟度的化合物是菲系列与萘系列化合物。研究表明,随着热演化程度的增加,热稳定性较高的 3-甲基菲(MP)和 2-MP 的含量增加,而热稳定性较低的 9-MP 和 1-MP 的含量减少^[13]。Radke 提出以甲基菲指数 ($MPI-1=1.5\times(3-MP+2-MP)/(菲+9-MP+1-MP)$) 来衡量原油的成熟度,同时 Radke 等还提出了 $MPI-1$ 与镜质体反射率(R_o) 之间的关系式 $R_o=0.6\times MPI-1+0.4$ ($R_o<1.3\%$); $R_o=-0.6\times MPI-1+2.3$ ($R_o>1.3\%$)^[14]。萘系列化合物异构体之间的比值在一定程度上也可以反映原油的成熟度。1,5-二甲基萘(DMN)为 $\alpha\alpha$ 构型,2,6-DMN 和 2,7-DMN 为 $\beta\beta$ 构型,由于 $\alpha\alpha$ 构型较 $\beta\beta$ 构型具有更高的活性,随着热效应增加, $\alpha\alpha$ 构型能发生重排生成更稳定的 $\beta\beta$ 构型化合物;另外,1,3,6-三甲基萘(TNR)和 1,3,7-TNR 的相对含量随成熟度的增加增大,而 1,2,5-TNR 的相对含量则相应降低;据此可以用二甲基萘、三甲基萘比值来衡量原油的相对成熟度^[15]。本研究针对以上多个芳烃参数进行计算(表 1)。

根据热模拟产物中各芳烃参数的计算结果,与实测 R_o 值建立交会图(图 3)。由交会图可以看出,甲基菲系列参数中, $MPI-1$ 、 $MPI-2$ 随 R_o 的增大而增大,具有非常好的正相关性,且 $R_o=0.7\%\sim 2.5\%$ 范围内表现出该趋势均适用(图 3a, b);而

表 1 计算相对成熟度所采用的芳烃参数表
Table 1 Aromatic parameters for calculation of relative maturity

芳烃参数	计算公式
甲基菲指数 1	$MPI-1 = 1.5(2-MP+3-MP)/(P+1-MP+9-MP)$
甲基菲指数 2	$MPI-2 = 3(2-MP)/(P+1-MP+9-MP)$
甲基菲比值	$MPR = 2-M6+P/1-MP$
二甲基菲指数	$DPR = (2,6-DMP+2,7-MP)/(1,6-+2,10-MP)$
甲基萘指数	$MNR = 2-MN/1-MN$
二甲基萘指数	$DNR = (2,6-DMN+2,7-DMN)/1,5-DMN$
三甲基萘指数 1	$TNR-1 = 2,3,6-TMN/(1,4,6-+1,3,5-TMN)TMN$
三甲基萘指数 2	$TNR-2 = (2,3,6-+1,3,7-TMN)/(1,4,6-+1,3,5-1,3,6-TMN)$

表中, P: 菲; N: 萘; M: 甲基; DM: 二甲基; TM: 三甲基。

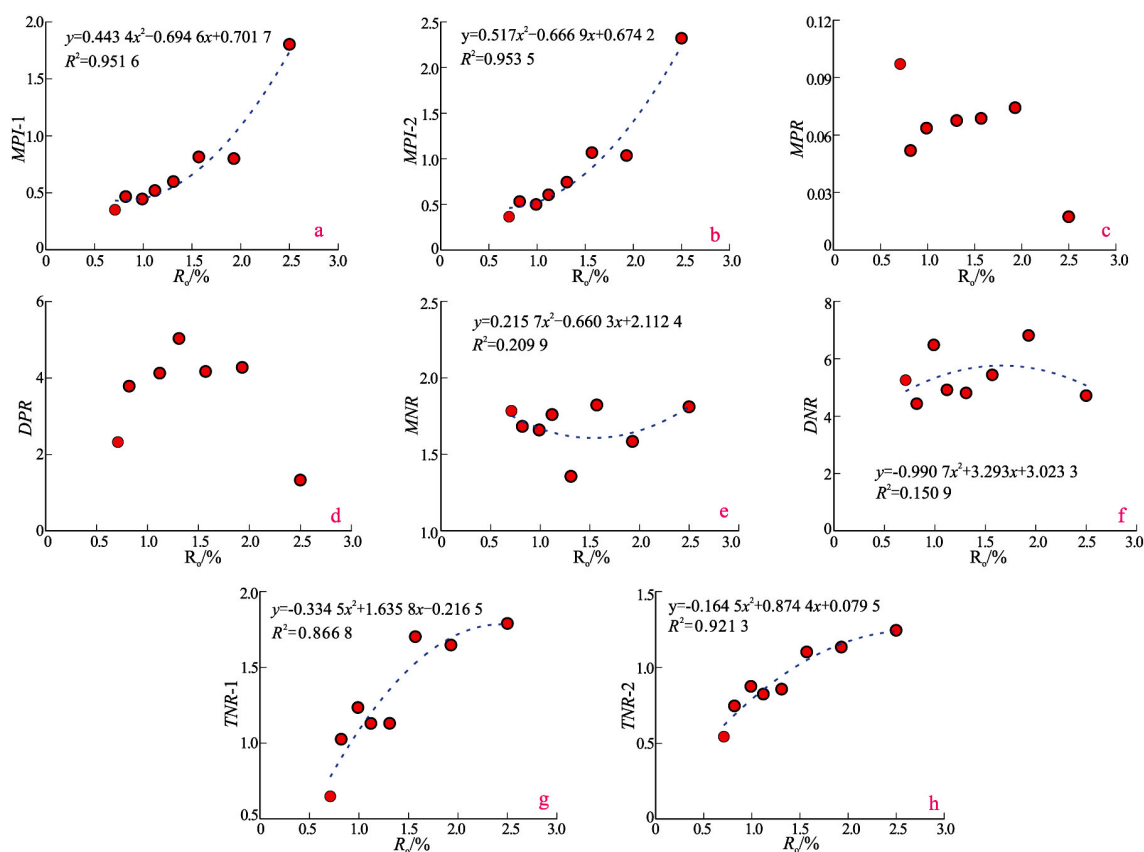
图3 不同芳烃成熟度参数与实测 R_o 相关图

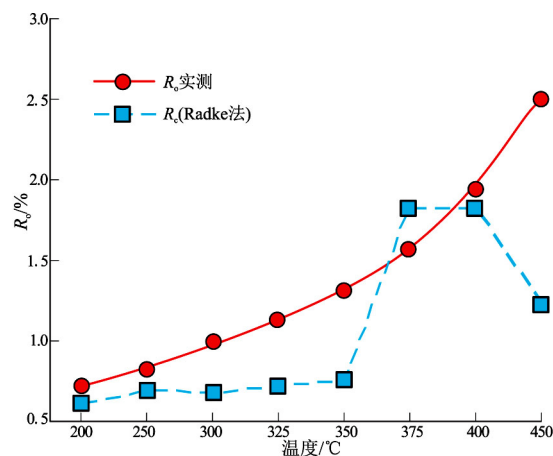
Fig. 3 Relationship between aromatic parameter and measured vitrinite reflectance

MPR 指标仅在 $R_o=0.7\% \sim 2.0\%$ 阶段内有较好的正相关性(图 3c); DPR 指标在 $R_o < 1.2\%$ 阶段成正相关, 在 $R_o > 1.2\%$ 范围内与热演化程度呈现为负相关, 整体与实测 R_o 相关性较差(图 3d)。

萘和烷基萘化合物参数中, 随热演化程度增加, 甲基萘 (MNR) 和二甲基萘 (DNR) 参数的变化趋势不明显(图 3e f), 表现为与热演化程度呈弱相关性; 三甲基萘参数 ($TNR-1$ 、 $TNR-2$) 在 $R_o=0.7\% \sim 2.5\%$ 范围内与 R_o 具有较好的正相关性(图 3g h)。

综合对比认为, 甲基萘参数 $MPI-1$ 、 $MPI-2$ 与成熟度的相关性好; TNR 参数次之; MPR 、 DPR 相关性较差; MNR 、 DNR 最差。

利用热模拟实验中各演化程度产物的甲基萘的实验结果, 针对 Radke 的成熟度计算公式适用性进行验证。根据 Radke 提出的 $MPI-1$ —成熟度 (R_c) 公式计算结果与实测 R_o 对比(图 4)可以看出, 在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 之前, Radke 公式所计算的 R_c 显著小于 R_o 实测结果, 其中 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 产物中, 计算与实测成熟度差值可达 0.5% ; 在演化至 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 的 R_o 仅为 1.22% , 与实测 R_o 结果 2.5% 相差较大。这可能由于芳烃参数受沉积环境、母质类型等因素的影响^[16], 导致不同地区或不同供烃来源的原油芳烃参数存在差

图4 Radke 公式计算 R_c 与实测 R_o 对比Fig. 4 Comparison between measured R_o and R_c calculated from Radke formula

异, 进而影响芳烃计算成熟度公式的应用。

根据上述各芳烃成熟度指标与实测 R_o 的相关性及 R_o 适用范围, 确定采用 $MPI-1$ 、 $MPI-2$ 、 $TNR-2$ 等参数, 建立了各参数计算原油成熟度公式, 相关系数均在 0.94 以上。

$$R_{c1}(MPI-1) = -1.088 5 \times (MPI-1)^2 + 3.609 8 \times (MPI-1) - 0.468 9; (R^2 = 0.958)$$

$$R_{c2}(MPI-2) = -0.482\ 2 \times (MPI-2)^2 + 2.229\ 7 \times (MPI-2) - 0.076\ 8; (R^2 = 0.957)$$

$$R_{c3}(TNR-2) = 3.263\ 3 \times (TNR-2)^2 - 3.470\ 6 \times (TNR-2) + 1.660\ 4; (R^2 = 0.942)$$

3.2 哈山地区原油特征

3.2.1 哈山地区原油物性与地化特征

哈山地区不同层系的原油物性差异较大。其中超剥带地质单元内的中生界原油以稠油为主,多为高密度、高黏度、高凝固点、低含蜡量和低含硫量的特点。逆冲推覆带地质单元内的古生界原油品质相对较好,为普通稠油和中质原油。其中风城组原油属于正常重质油,含硫量和凝固点均较低。因此纵向上,随埋深减小,原油物性呈现变差的趋势,密度、黏度和凝固点增大。

由该区原油与源岩色谱、质谱图(图5)可以看出,原油与源岩的 C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷均为上升型分布,五环三萜烷含量相对较高, β -胡萝卜素含量丰富,伽马蜡烷丰度基本一致, C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷为逐渐上升的趋势,原油与 P_{1f} 烃源岩整体表现为一致的特征。不同层位的样品生物降解程度差异较大,其中,侏罗系等浅层原油遭受生物降解,饱和烃部分损失,25-降藿烷丰度较低,但甾烷、萜烷与芳烃组分保持相对完整;二叠系原油降解程度较低,饱和烃保存完好,多表现为正常原油。据前人研究,在未遭受生物降解作用时,芳烃中烷基萘与烷基菲的相对丰度一般表现为 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$;

在遭受中等及以上程度的生物降解作用时,侧链碳数多的取代基系列的丰度将相对升高;甲基菲指数($MPI-1$ 和 $MPI-2$)等芳烃成熟度参数随原油遭受的生物降解作用的发生略微变化,在中等强度降解作用前,可忽略不计^[17-18];而对于生物降解作用程度较强的原油,根据相关参数判识原油成熟度时应谨慎使用。

3.2.2 哈山地区原油成熟度分析

选取哈山地区白垩与侏罗系降解程度较低的原油、二叠系原油和源岩样品,按照前述各芳烃参数所建立的原油成熟度计算公式,计算成熟度 R_o (表2)。

从不同芳烃参数计算的 R_o 结果表可以看出,白垩系原油样品的成熟度均较高,其中HQ1井白垩系(288.2 m)原油指示的源岩成熟度 $R_o = 1.27\% \sim 1.72\%$,HQ6井白垩系(77.59 m)原油指示的源岩成熟度 $R_o = 1.37\% \sim 1.63\%$,证明白垩系的原油属于高成熟原油,推测为玛湖地区高成熟烃源岩所生成的油气远距离运移。

侏罗系、三叠系等层位的原油成熟度相比白垩系略低,多分布于 $0.76\% \sim 1.14\%$,均与哈山本地烃源岩成熟度接近。哈浅101井与哈浅6井石炭系的原油样品指示的源岩成熟度 R_o 多分布于 $0.8\% \sim 1.1\%$,与HQ6二叠系源岩实测的成熟度 R_o 值对应,因此,推测来源于哈山地区二叠系。

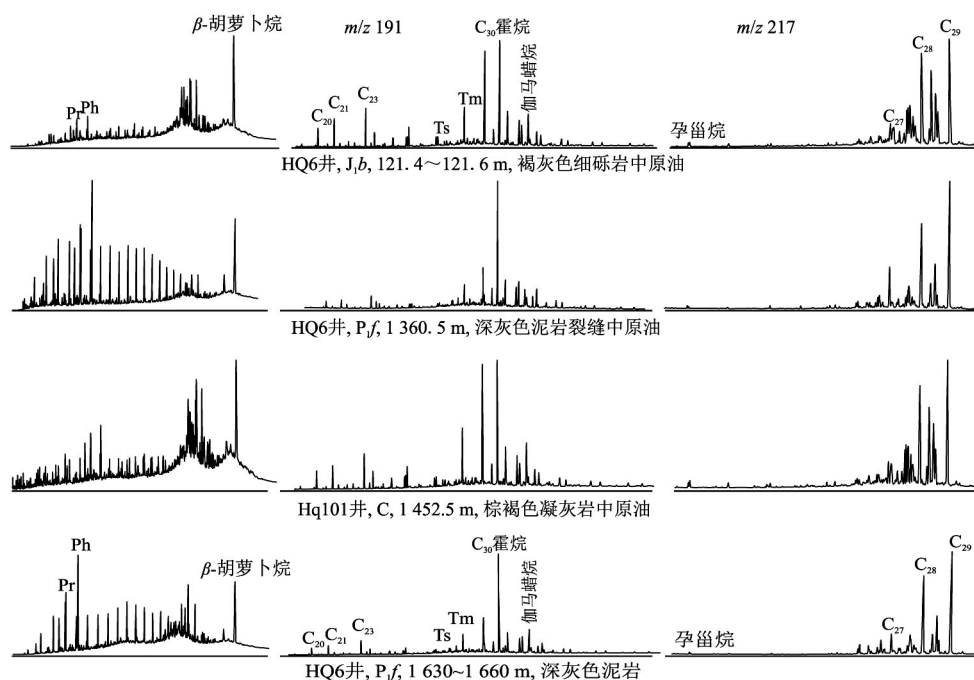


图5 准噶尔盆地哈山地区原油与源岩色谱质谱图

Fig.5 Chromatograms and mass spectrum of oil and source rocks from Hala' alate area, Junggar Basin

表2 准噶尔盆地哈山地区芳烃成熟度参数与 R_o 结果

Table 2 Aromatic parameter and calculated maturity from Hala' alate area, Junggar Basin

井名	样品类型	层位	MPI-1	MPI-2	TNR-2	R_{c1} (MPI-1) /%	R_{c2} (MPI-2) /%	R_{c3} (TNR-2) /%	源岩实测 R_o /%
HQ1	油砂	K	0.21	0.26	0.93	1.72	1.43	1.27	
HQ6-1	油砂	K	0.18	0.15	1.02	1.63	1.37	1.52	
HQ2	油砂	J ₁ b	0.40	0.46	0.77	0.80	0.84	0.92	
HQ20	油砂	T	0.48	0.56	0.89	1.01	1.02	1.16	
HQ6-5	油砂	P	0.50	0.55	0.62	1.06	1.00	0.76	
HQ101	油砂	C	0.53	0.62	0.82	1.14	1.12	1.01	
HQ6-2	深灰色泥岩	P	0.36	0.39	0.53	0.69	0.73	0.74	0.82
HQ6-3	灰质泥岩	P	0.43	0.46	0.55	0.88	0.85	0.74	0.85
HQ6-4	灰质泥岩	P	0.50	0.55	0.77	1.06	1.00	0.92	0.89

4 结论与讨论

(1) 通过对哈山地区 P_{if} 低熟烃源岩样品进行高温热模拟实验, 针对不同热演化阶段的液态烃产物进行芳烃参数统计, 分析各参数与实测 R_o 值的相关性, 据此建立了哈山地区芳烃参数计算成熟度的相关公式, 与 Radke 所建公式相比, 更加符合本地区实际演化程度。

(2) 针对哈山地区油砂及原油样品, 利用所建立的多个芳烃参数— R_o 模型进行计算, 不同公式所计算的成熟度结果基本一致, 具有一定的可靠性。

(3) 本文所建立的成熟度计算公式是以原油在生成过程中完全保存并成藏为出发点, 对于分段捕获的油气适用性未深入分析; 另外使用中需考虑沉积环境、母质类型、生物降解等因素的差异。

参考文献:

- [1] 李林强, 林壬子. 利用芳烃化合物研究东濮凹陷西斜坡地区原油成熟度[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 361–366.
Li Linqiang, Lin Renzi. Study on maturity of crude oil distributed in west slope of Dongpu Depression using aromatic compounds[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 361–366.
- [2] 马军, 李水福, 胡守志, 等. 芳烃化合物组成及其在油气地球化学中的应用[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 73–79.
Ma Jun, Li Shuifu, Hu Shouzhong, et al. The composition of aromatic hydrocarbon and its application in petroleum geochemistry[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 73–79.
- [3] 阙永泉, 郑伦举, 承秋泉, 等. 有机质热解模拟实验残留物镜质体反射率校正研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(4): 506–511.
Que Yongquan, Zheng Lunju, Cheng Qiuyan, et al. Vitrinite reflectance correction of residues in organic matter pyrolysis simulation experiments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 506–511.
- [4] 倪春华, 包建平, 梁世友. 渤海湾盆地渤中凹陷原油成熟度的多参数综合评价[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 399–402.
Ni Chunhua, Bao Jianping, Liang Shiyu. Overall evaluation by

multi-parameters on maturity of crude oil from the Bozhong Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 399–402.

- [5] 孟江辉, 张敏, 姚明君. 不同沉积环境原油的芳烃组成特征及其地质地球化学意义[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(1): 228–231.
Meng Jianghui, Zhang Min, Yao Mingjun. Features of aromatic composition in crude under different sedimentary environments and its geochemical meanings [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J JPI), 2008, 30(1): 228–231.
- [6] 师生宝, 李美俊, 朱雷. 石油及沉积有机质中 C_1 -和 C_2 -烷基二苯并噻吩鉴定及分布[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 612–617.
Shi Shengbao, Li Meijun, Zhu Lei. Identification and distribution of C_1 - and C_2 -alkylated dibenzothiophenes in petroleum and sedimentary organic matter [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 612–617.
- [7] Peters K E, Moldowan J M. 生物标记化合物指南: 古代沉积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜乃煌, 张水昌, 林永汉, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: Interpretation of molecular fossils in ancient sediment and petroleum[M]. Jiang Naihuang, Zhang Shuichang, Lin Yonghan, et al, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [8] Mango F D. An invariance in the isooheptanes of petroleum[J]. Science, 1987, 237(4814): 514–517.
- [9] Connan J. Biodegradation of crude oils in reservoirs[M]//Brooks J, Wehe D H, eds. Advances in petroleum geochemistry: Vol. 1. London: Academic Press, 1984: 299–355.
- [10] 朱扬明, 张洪波, 傅家谟, 等. 塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 33–37.
Zhu Yangming, Zhang Hongbo, Fu Jiamo, et al. Distribution and composition of aromatic hydrocarbon in various oils from Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 33–37.
- [11] 孟任祥, 张松林, 崔明中, 等. 不同沉积环境湖相低熟原油的芳烃分布特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 112–120.
Meng Qianxiang, Zhang Songlin, Cui Mingzhong, et al. Distribution features of aromatics in lacustrine low-mature crude oils from different environments [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 112–120.

(下转第 691 页)

- [18] 程顶胜, 冀立荣, 黎颖英, 等. 苏丹 M 盆地高酸值原油有机酸的组成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 762–765.
Cheng Dingsheng, Dou Lirong, Li Yingying, et al. Component and distribution of organic acid oil with high TAN, M Basin, Sudan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 762–765.
- [19] Cooper J E. Fatty acids in recent and ancient sediments and petroleum reservoir waters [J]. Nature, 1962, 193(4817): 744–746.
- [20] Cooper J E, Bray E E. A postulated role of fatty acids in petroleum formation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963, 27(11): 1113–1127.
- [21] 张松林, 崔明中, 李振西, 等. 盐湖相低熟油脂肪酸的组成与分布特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 130–135.
Zhang Songlin, Cui Mingzhong, Li Zhenxi, et al. Composition and distribution features of fatty acids in salt-lake immature oils [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 130–135.
- [22] 约翰斯 R B. 沉积记录中的生物标志物[M]. 王铁冠, 译. 北京: 科学出版社, 1991: 171–177.
Johns R B. Biomarker depositional record [M]. Wang Tieguan, trans. Beijing: Science Press, 1991: 171–177.
- [23] 文志刚, 林九皓, 邹华耀. 江汉盆地樊参 1 井二元脂肪酸的色谱质谱特征及地球化学意义初探[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 18(3): 25–28.
Wen Zhigang, Lin Jiuhao, Zou Huayao. GC-MS characteristics and geochemical significance of diatomic fatty acids from well Fancan-1 in Jianghan Basin [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1996, 18(3): 25–28.
- [24] 向明菊, 史继杨, 周友平, 等. 不同类型沉积物中脂肪酸的分布、演化和生烃意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 84–88.
Xiang Mingju, Shi Jiyang, Zhou Youping, et al. The distribution and evolution of fatty acids in various sediments and its significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 84–88.
- [25] 吕振波, 姚立刚, 张振庚, 等. 环烷酸结构组成的质谱分析方法[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2006, 26(3): 1–3.
Lü Zhenbo, Yao Ligang, Zhang Zhengeng, et al. Determination structure constitute of naphthenic acids by MS [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2006, 26(3): 1–3.

(编辑 黄娟)

~~~~~

(上接第 684 页)

- [12] 王志勇, 郑建京, 杜宏宇, 等. 东疆地区原油芳烃地球化学特征及其意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 184–191.  
Wang Zhiyong, Zheng Jianjing, Du Hongyu, et al. The geochemical characteristics and significance of aromatic hydrocarbon of eastern Xinjiang area crude oils [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 184–191.
- [13] 包建平, 王铁冠, 周玉琦, 等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. 江汉石油学院学报, 1992, 14(4): 8–13.  
Bao Jianping, Wang Tieguan, Zhou Yuqi, et al. The relationship between methyl phenanthrene ratios and the evolution of organic matter [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1992, 14(4): 8–13.
- [14] Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils [J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5(3): 224–236.
- [15] 陈致林, 李素娟, 王忠. 低一中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 192–197.  
Chen Zhilin, Li Sujuan, Wang Zhong. A study on maturity indicators of some aromatics in low-mid mature thermal evolution zones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 192–197.
- [16] 姜乃煌, 黄第藩, 宋孚庆, 等. 不同沉积环境地层中的芳烃分布特征[J]. 石油学报, 1994, 15(3): 42–50.  
Jiang Naihuang, Huang Difan, Song Fuqing, et al. Distribution characteristics of aromatics in formations under different sedimentary environments [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(3): 42–50.
- [17] 包建平, 朱翠山. 生物降解作用对辽河原油芳烃组成与芳烃成熟度参数的影响[J]. 中国科学(D 辑 地球科学), 2008, 38(S2): 55–63.  
Bao Jianping, Zhu Cuishan. The effects of biodegradation on the compositions of aromatic hydrocarbons and maturity indicators in biodegraded oils from Liaohe Basin [J]. Science in China (Series D Earth Sciences), 2009, 52(S1): 59–68.
- [18] 包建平, 朱翠山. 生物降解作用对辽河辽河盆地原油甾萜成熟度参数的影响[J]. 中国科学(D 辑 地球科学), 2008, 38(S2): 38–46.  
Bao Jianping, Zhu Cuishan. The effects of biodegradation on biomarker maturity indicators in sequentially biodegraded oils from Liaohe Basin, China [J]. Science in China (Series D Earth Sciences), 2009, 52(S1): 42–50.

(编辑 黄娟)