

文章编号:0253-9985(2013)01-0027-10

塔里木盆地和田河气田轻质油成熟度判定及其油源意义

崔景伟^{1,2}, 王铁冠², 胡健², 李美俊²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:为评价和田河气田轻质原油的成熟度,利用气相色谱与气相色谱-质谱联用仪,对和田河气田4个轻质原油中具有成熟度信息的化合物进行分析。轻烃庚烷值与异庚烷值、甲基双金刚烷参数、甲基菲参数、甲基二苯并噻吩参数和 $Ts/(Ts + Tm)$ 成熟度参数显示和田河轻质油处于高成熟阶段(凝析油阶段),烷基萘类成熟度参数、 C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 显示尚未进入生烃高峰期。轻烃等参数显示原油高成熟与原油密度等物理性质一致,烷基萘类成熟度参数成熟度偏低可能与原油存在轻微生物降解有关,甾烷成熟度参数偏低是演化达到平衡终点后翻转所致。综合成熟度参数认为,和田河气田轻质原油处于成熟末期-高成熟阶段。与该地区典型的烃源岩样品成熟度对比,推断轻质原油与天然气同源,主要来自寒武系烃源岩。甾萘类生物标志物油-源对比分析支持该结论。

关键词:成熟度参数;油源;轻质油;和田河气田;塔里木盆地

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Maturity of light oil and its significance in indicating oil source in Hetianhe gas field, Tarim Basin

Cui Jingwei^{1,2}, Wang Tieguan², Hu Jian² and Li Meijun²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: GC and GC-MS analysis was performed on compounds possibly containing information on maturity in four light oil samples selected in Hetianhe gas field. Maturity indexes including heptane index, isoheptane index, methyladamantane index, MPI, methylthiophene (MDBTs) and $Ts/(Ts + Tm)$ indicate that the light oil in Hetianhe gas field is at high maturation stage (gas condensate). In contrast, methylthiophene, C_{29} sterane $20S/(20S + 20R)$ and C_{29} sterane $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ suggest that the source rocks have not entered peak oil generation stage. Indexes such as light hydrocarbon show that high maturity of the light oil is consistent with its physical properties. The anomalies of naphthalenes may be the result of weak biodegradation, while the low sterane indexes may be the result of overturning at the end of evolutionary balance. Comprehensive analyses of the maturity indexes reveal that the light oil is at the end of maturation-high maturation stage. Furthermore, comparison with the typical local source rocks indicates that both the light oil and natural gas are generated by the Cambrian source rocks, a conclusion supported by oil-source correlation based on sterane and terpane.

Key words: maturity index, source rock, light oil, Hetianhe gas field, Tarim Basin

和田河气田是塔里木盆地最大的海相碳酸盐岩天然气藏,位于塔里木盆地中央隆起巴楚凸起南缘的马扎塔格构造带^[1]。天然气成分分析显示

天然气干燥系数较高,是典型的干气^[2-3]。前人大量的研究认为其来源于下寒武统烃源岩,类型上属原油裂解气或者干酪根裂解气亦或两者的混合气,

收稿日期:2011-09-23;修订日期:2012-10-15。

第一作者简介:崔景伟(1980—),男,博士后,成藏地球化学与非常规油气地质。

基金项目:国家自然科学基金项目(40972089)。

和田河气田东西部天然气组成和干燥系数差异可能是 TSR 或者天然气运移分馏造成^[4-8]。除天然气外,和田河气田在玛3井石炭系生屑灰岩段和玛4井等奥陶系砂砾岩段获得少量轻质油且石炭系产量明显高于奥陶系。对于这些轻质油的来源存在来自寒武系烃源岩与石炭系卡拉沙依组煤系烃源岩或者两者混合贡献之说^[9-10]。明确轻质原油的来源,对认识和田河气田成藏过程具有重要的意义。

特别是近年来中国石化西北油田分公司在麦盖提斜坡玉北1井奥陶系取得原油勘探的突破,麦盖提斜坡作为古被动大陆边缘的一部分重新成为勘探的热点地区^[11-13]。有鉴于此,采集和田河气田3口油井2个产层的4个原油样品,对原油的物理性质以及分子标志化合物进行分析,特别是对于轻质原油具有成熟度信息的化合物。根据轻质原油分子地球化学特征和成熟度结果对其来源进行综合判定。

1 区域地质背景

和田河气田及其周缘经历了加里东运动、海西运动、印支-喜马拉雅期等多期构造运动,从区域北倾变成南倾,同时发育古隆起的演化过程^[13]。加里东中期构造运动使得和田河气田及其周缘奥陶系遭受剥蚀,区域上为北倾斜坡,而喜马拉雅期巴楚断隆隆升强烈,昆仑山前快速沉降并沉积了巨厚的磨拉石建造,和田河气田及其周缘也由北倾斜坡转化成南倾斜坡^[14]。

前人研究认为该区主要发育3套烃源岩,寒武系烃源岩在巴楚地区主要是一套蒸发潟湖相沉积物,主要是泥质泥晶灰云岩,有机质丰度 TOC 分布为 0.21%~2.43% (平均 0.81%),有机质类型为腐泥型,镜质体反射率 (R_o) 值显示高成熟-过成熟阶段 (1.65%~2.32%)。奥陶系烃源岩为一套灰-深灰色泥灰质烃源岩, TOC 为 0.21%~

1.99% (平均值为 0.93%),有机质类型为腐泥型及混合型, R_o 显示处于凝析油阶段 (1.1%~1.4%),但和田古隆起的存在导致奥陶系烃源岩在该区分布有限。石炭系发育泥质岩和碳酸盐岩烃源岩,主要是巴楚组生屑灰岩和卡拉沙依组煤系泥岩,石炭系烃源岩有机质类型为腐殖型或者混合型, R_o 为 0.65%~0.87%,属于低成熟-成熟阶段^[15-16]。

2 样品与实验

本次实验采集到和田河气田玛3井、玛4井和玛5井的4个轻质原油,原油产层和物理性质见表1,采样位置见图1。原油密度 (20℃时) 为 0.75~0.82 g/cm³,一般 0.8 g/cm³ 左右,凝固点一般低于 -30℃,硫含量一般低于 0.2%、蜡含量低于 0.69%。

和田河凝析油气田的轻质油族组成基本上以饱和烃为主 (占 47.2%~79.3%),芳烃 (7.3%~30.6%) 与非烃含量 (8.1%~22.2%) 变化较大,基本不含沥青质,饱芳比 1.5%~10.9%。

饱和烃色谱分析在岛津 GC17A 型气相色谱仪上完成。分析条件:色谱柱为 HP-PONA (50 m × 0.25 mm × 0.25 μm),载气为氦气 (1.5 mL/min),分流模式,分流比 50:1。升温程序为 50℃ 保留 1 min,以 4℃/min 升到 290℃后,恒温 30 min。

饱和烃与芳烃用 Agilent 6890 GC-5975i MS 色谱-质谱联用仪分析,配置 DB-5 熔硅弹性毛细柱 (60 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 和 NIST2.0 数据处理系统。色谱分析条件:程序升温从 80℃ 恒温 1 min,以 3℃/min 速率升至 300℃,再恒温 15 min;采用氦气载气,气化室保持 300℃。质谱分析条件:离子源采用电子轰击 (EI) 方式,电离电压 70eV,发射电流 300 μA,信号倍增电压 1 000 V,质量扫描范围 m/z 为 50~600。

表1 和田河气田轻质油物理性质

Table 1 Physical properties of light oil in Hetianhe gas field

井号	井深/m	层位	密度/(g·cm ⁻³)	含蜡量/%	含硫量/%	凝固点/℃	原油类型
玛3	1 414~1 424	C ₁ b	0.80~0.82		0.02	-36°未凝	轻质油
玛3	1 508~1 518	O ₁₋₂ y	0.82~0.84		0.02	-35°未凝	轻质油
玛4	2 044~2 140	O ₁₋₂ y	0.81	0.69		-35°	轻质油
玛5	1 960~1 967	C ₁ b	0.75~0.80		0.08~0.20	-35°未凝	轻质油

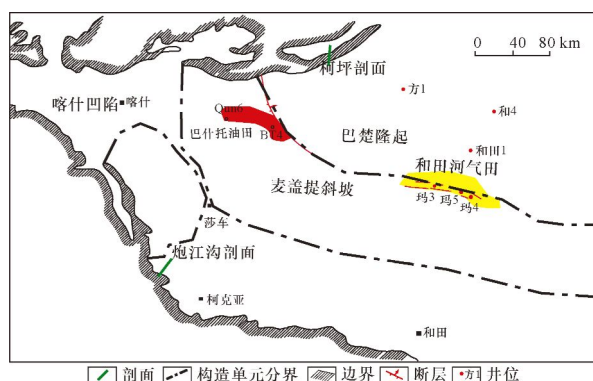


图1 塔西南地区构造分区与采样点分布

Fig. 1 Structural units and sampling sites in the Southwest Tarim Basin

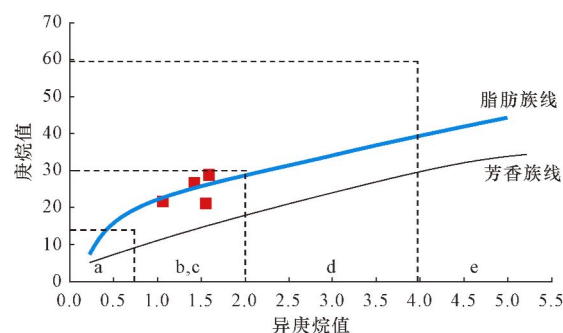


图2 和田河气田轻质油轻烃庚烷值和异庚烷值相关关系

Fig. 2 Correlation of heptane value and isoheptane value of light oil in Hetianhe gas field

a. 低成熟和生物降解原油; b, c. 成熟原油; d. 高成熟原油; e. 过成熟原油

3 结果与讨论

目前常用生物标志物成熟度指标判别原油成熟度,但未必能真实地反映原油的成熟度。定量地确定原油的成熟度是国内外学者正在探求解决的问题,尚缺少有效的方法,因此对轻烃、饱和烃和芳烃这3类化合物中蕴含的成熟度信息进行综合分析。

3.1 轻烃成熟度

按照 Thompson 提出的 H (庚烷值)和 I (异庚烷值)值成熟度划分标准^[17],塔西南地区原油都聚类于脂肪族线上方的区域或者脂肪族线与芳香族线之间的区域,反映塔西南原油具有 I 型和 II 型有机质烃源岩特征。根据王培荣等^[18]对 Thompson 图版修改可以判定和田河气田轻质油处于成熟阶段或即将进入高成熟阶段(图2)。此外,根据 Magoo 等^[19]稳态过渡金属催化生烃理论,认为轻烃组分 2,4-二甲基戊烷/2,3-二甲基戊烷的比值可以反映原油的生成温度,具有成熟度的意义,但和田河轻质油中轻烃含量较低,特别是 2,4-二甲基戊烷与 2,3-二甲基戊烷含量低于检测线。

3.2 饱和烃组分成熟度

对中-高成熟度的原油($R_o \geq 0.9\% \sim 1.3\%$),较为有效的生物标志化合物成熟度指标均已失效。如常用的成熟度参数 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值都已

达到热演化平衡点。文中对和田河轻质油计算 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 的值分布范围分别为 $0.33\% \sim 0.46\%$ 和 $0.37\% \sim 0.48\%$ 。

和田河轻质油饱和烃色谱基线处形成了“明显的鼓包”,特别是玛5井在饱和烃色谱图上显示以 Pr 为主峰(图3),但是对应的 m/z 177 质量色谱图没有出现 25-降藿烷系列(图4),表明和田河轻质油经受轻微的生物降解。尽管原油遭受轻微的生物降解,但金刚烷类化合物属于成烃演化过程中的次生产物,有很强的抗热力和抗生物降解破坏的能力^[20-23]。Chen 等^[24]提出甲基单金刚烷(MA)成熟度指标 $IMA = 1 - MA/(1 - MA + 2 - MA)$,和甲基双金刚烷(MD)成熟度指标 $IMD = 4 - MD/(1 - MD + 3 - MD + 4 - MD)$ 均可以作为原油成熟度指标,并建立了 IMD 和 R_o 的对应关系($R_o = 0.024 3IMD + 0.438 9$,相关系数 $R^2 = 0.803 9$)。由于认为金刚烷指标一般不受原始有机质类型、沉积环境和运移效应的影响,故认为金刚烷指标在高、过成熟阶段的原油和烃源岩成熟度的判识中是比较理想的有效指标,双金刚烷指标对烃源岩成熟度判识的有效性可能仅适用于生油高峰期至高成熟演化阶段($0.9\% \sim 2\%$)^[25]。本次实验分析的和田轻质油中具有丰富的金刚烷系列化合物, IMA 分布范围为 $0.5 \sim 0.7$, IMD 分布范围为 $0.38 \sim 0.59$ 。根据文献^[24]中的计算公式,得出和田河气田轻质油成熟度 R_{e1} 范围为 $1.36\% \sim 1.88\%$,表明原油处于高成熟阶段。

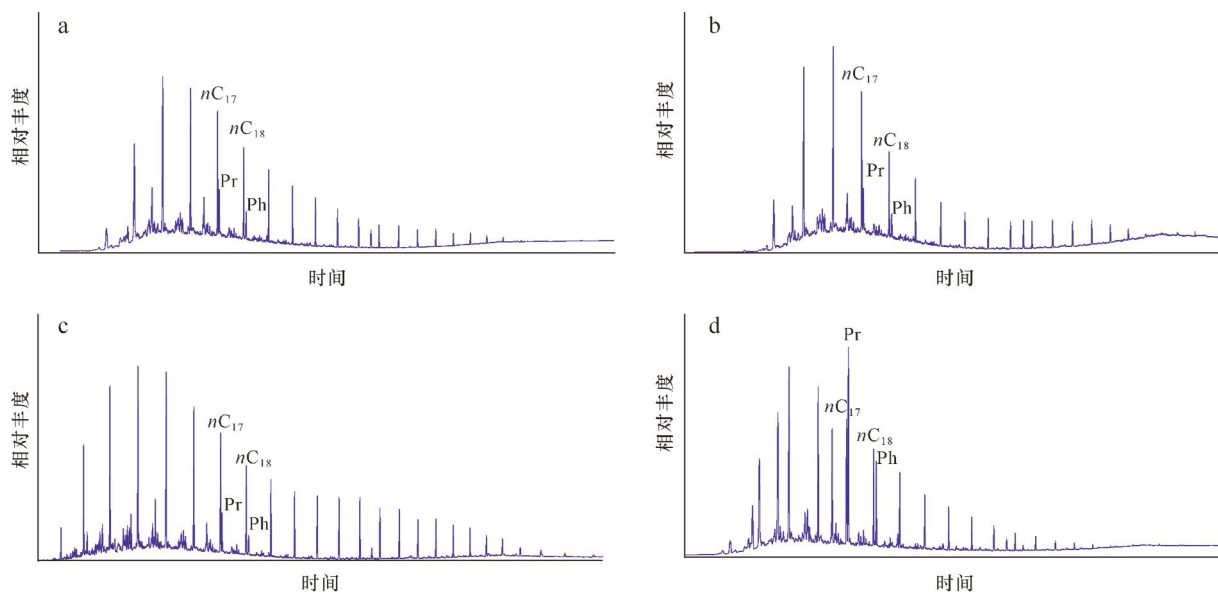
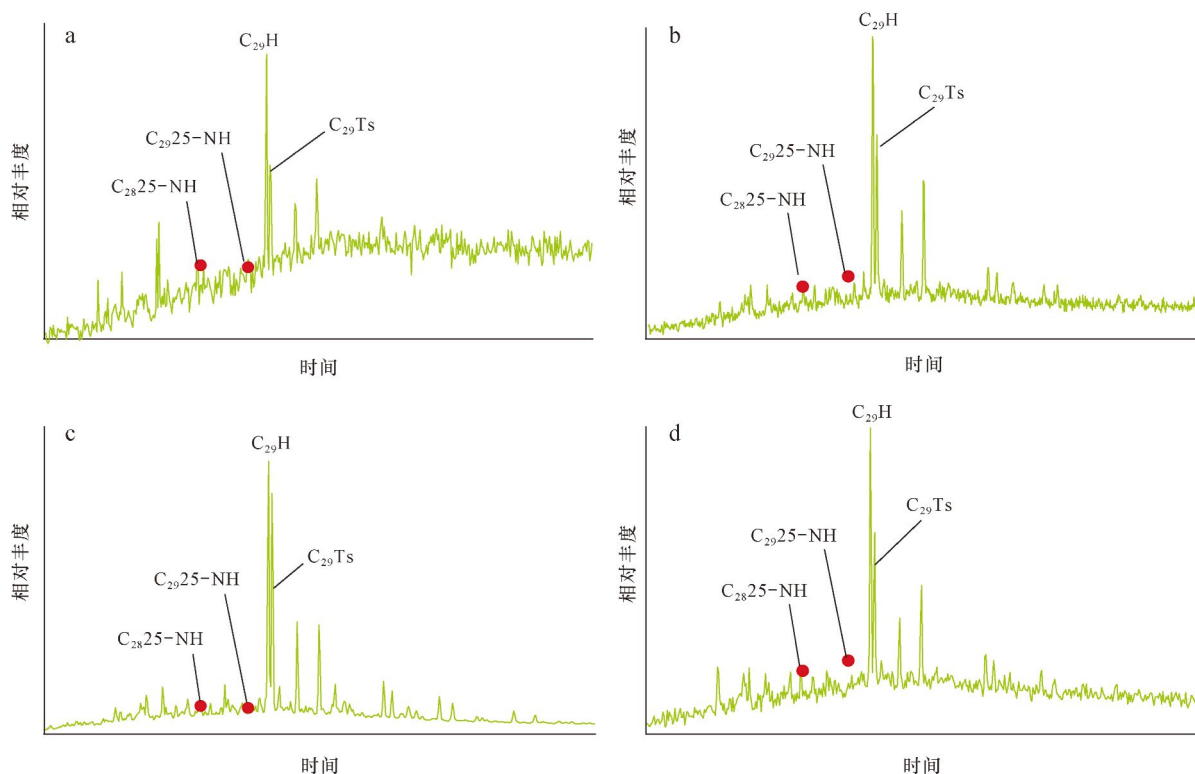


图3 和田河气田轻质油饱和烃色谱

Fig. 3 Gas chromatograph of saturated hydrocarbons in Hetianhe gas field

a. 玛3井, $O_{1+2}y$, 1 508 m; b. 玛3井, C_1b , 1 414 m; c. 玛4井, $O_{1+2}y$, 2 044 m; d. 玛5井, C_1b , 1 960 m

图4 和田河气田轻质油 m/z 177 质量色谱Fig. 4 Typical mass chromatograph(m/z 177) of light oil in Hetianhe gas field

a. 玛3井, $O_{1+2}y$, 1 508 m; b. 玛3井, C_1b , 1 414 m; c. 玛4井, $O_{1+2}y$, 2 044 m; d. 玛5井, C_1b , 1 960 m

$C_{28}25-NH$ 为 $C_{28}25$ -降藿烷; $C_{29}25-NH$ 为 $C_{29}25$ -降藿烷; $C_{29}H$ 为 $17\alpha(H)$ C_{29} 藿烷; $C_{29}TS$ 为 30 -降新藿烷

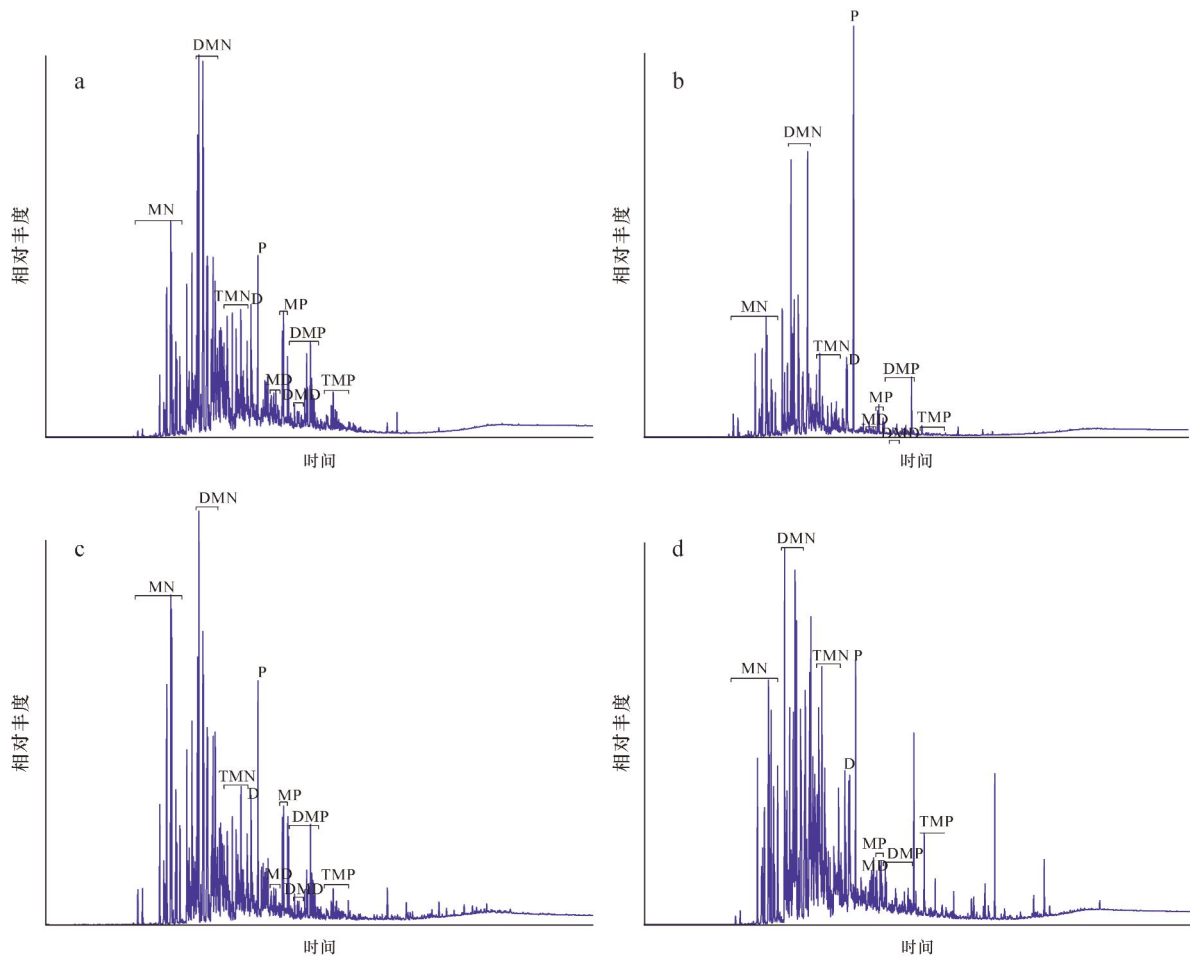


图5 和田河气田轻质油芳烃总离子流图

Fig. 5 Total ion count of aromatic fraction of light oil in Hetianhe gas field

a. 玛3井,原油, $O_{1+2}Y$,1 508 m;b. 玛3井,原油, C_1b ,1 414 m;c. 玛4井,原油, $O_{1+2}Y$,2 044 m;d. 玛5井,原油, C_1b ,1 960 m

MN为二甲基萘;DMN为二甲基萘;TMN为三甲基萘;D为二苯并噻吩;MD为甲基二苯并噻吩;

DMD为二甲基二苯并噻吩;P为菲;MP为甲基菲;DMP为二甲菲;TMP为三甲菲

3.3 芳香烃组分成熟度

芳烃组分中含有甲基菲,二苯并噻吩类以及烷基萘等一系列成熟度参数,和田河轻质油的芳烃总离子流图见图5,对上述化合物参数进行计算。

甲基菲指数(MPI ,包括 MPI_1 和 MPI_2)是由Radke等^[26]首先提出的成熟度参数。计算和田河气田轻质油的 MPI_1 值分布区间为1.60~2.61,根据Radke和Welte^[27]提出的计算公式等效成熟度 $R_c = 0.6 MPI_1 + 0.4$ ($0.65 \leq R_m < 1.35$)和 $R_c = -0.6 MPI_1 + 2.3$ ($1.35 \leq R_m < 2$),分别得出和田河气田轻质油的成熟度 R_{c2} 分布范围为1.36%~1.97%和0.92%~1.34%,表明和田河轻质油的成熟度范围处于成熟-高成熟阶段,这与轻烃庚烷

值与异庚烷值、甲基双金刚烷指标计算的成熟度一致。

此外,据近20余年国内外研究结果,二苯并噻吩系列化合物成熟度参数成为高-过成熟阶段海相碳酸盐岩及其油气有效分子成熟度指标,提出了4,6-DMDBT/1,4-DMDBT、2,4-DMDBT/1,4-DMDBT和4-MDBT/1-MDBT(DMDBT和MDBT分别为二甲基二苯并噻吩;甲基二苯并噻吩)等成熟度参数^[28-32]。Wang等^[33]根据成熟度参数对塔河油田奥陶系油藏进行了示踪研究,部分学者等^[34-35]提出了水洗作用可能导致二苯并噻吩类化合物的减小。和田河轻质油4-MDBT/1-MDBT计算等效成熟度为 $R_{c3} = 1.14\% \sim 1.38\%$,表明原油处于成熟-高成熟阶段。

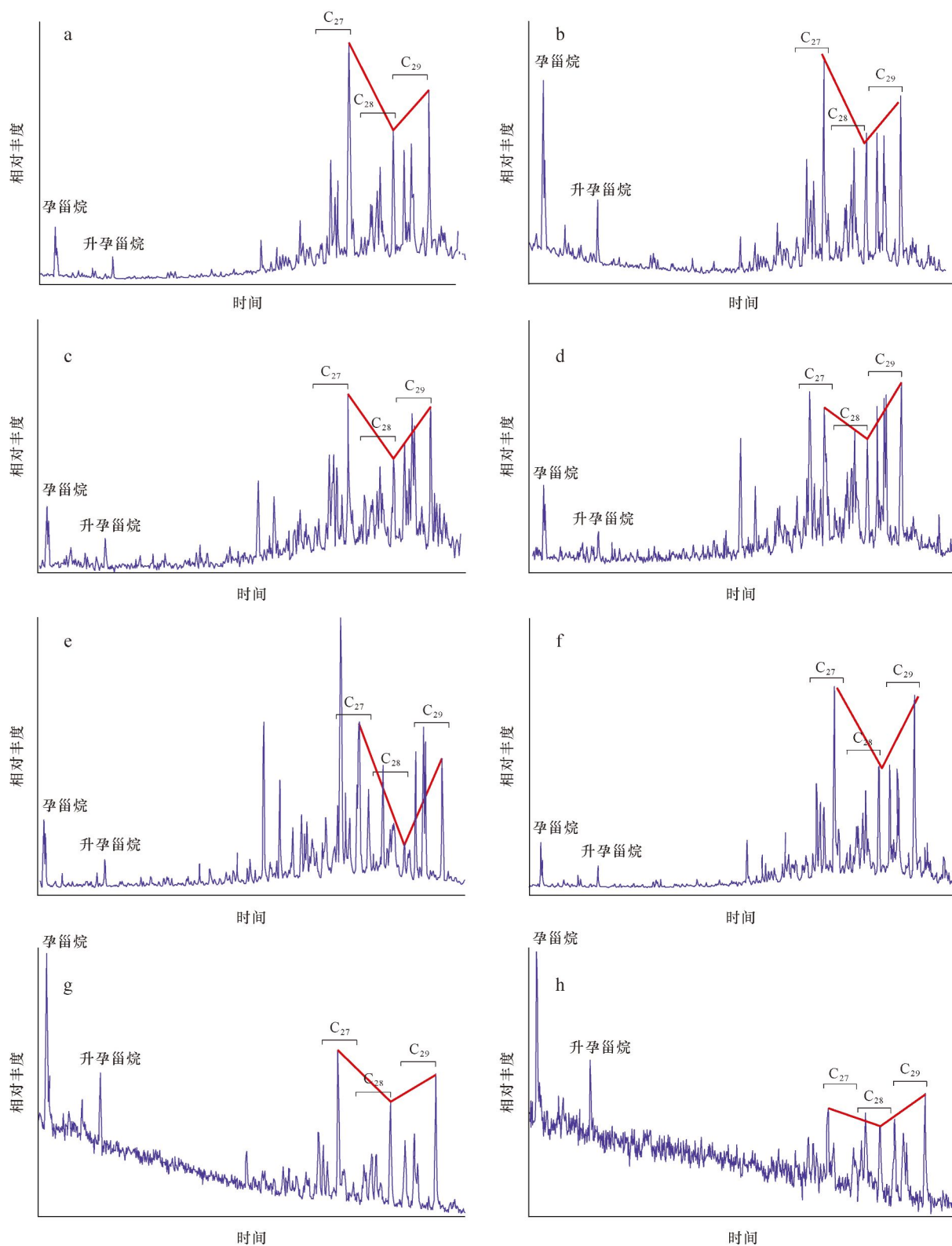


图6 和田河气田原油和区域源岩 m/z 217 典型质量色谱

Fig. 6 Typical mass chromatograph m/z 217 of light oil and regional source rocks in Hetianhe gas field

- a. 玛3井,原油, $O_{1+2}y$,1 508 m; b. 玛3井,原油, C_1b ,1 414 m; c. 玛4井,原油, $O_{1+2}y$,2 044 m; d. 玛5井,原油, C_1b ,1 960 m;
e. 和田1井,生屑灰岩, C_1b ; f. 炮2井,泥岩, C_2kl ; g. 柯坪剖面,黑色页岩, C_{1y} ; h. 和4井,灰色泥灰岩, C_3

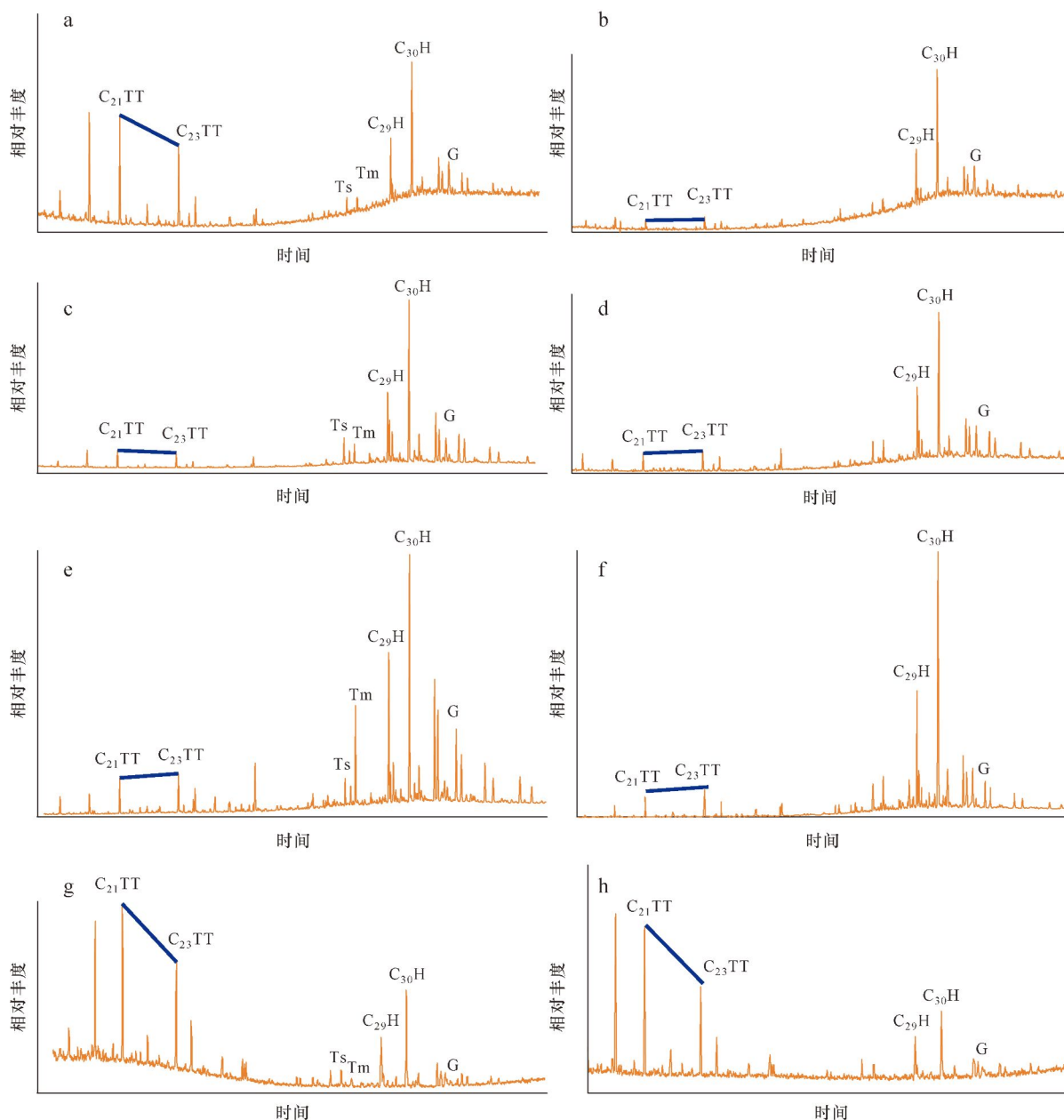


图7 和田河气田原油和区域源岩 m/z 191 典型质量色谱

Fig. 7 Typical mass chromatograph m/z 191 of light oil and regional source rocks in Hetianhe gas field

a. 玛3井,原油, $O_{1+2}y$,1 508 m;b. 玛3井,原油, C_1b ,1 414 m;c. 玛4井,原油, $O_{1+2}y$,2 044 m;d. 玛5井,原油, C_1b ,1 960 m;
e. 和田1井,生屑灰岩, C_1b ;f. 炮2井,泥岩, C_2kl ;g. 柯坪剖面,黑色页岩, C_{1y} ;h. 和4井,灰色泥灰岩, C_3

$C_{21}TT$ 为 C_{21} 三环萜烷; $C_{23}TT$ 为 C_{23} 三环萜烷; $C_{29}H$ 为 $17\alpha(H)$ C_{29} 藿烷; $C_{30}H$ 为 $17\alpha(H)$ C_{30} 藿烷;G 为伽马蜡烷

原油中还存在丰富的二甲基萜(DMN),三甲基萜(TMN),四甲基萜(TeMN),五甲基萜(PMN),甚至6个甲基取代的萜系列^[36]。前人对原油中烷基萜的形成机理和成熟度参数进行了总结,得出成熟度与生物降解对烷基萜(MN)的分布具有重要的影响,并根据烷基萜确定出一系列可以进行成熟度判别的指标,如 MNR ($MNR = 2 -$

$MN/1 - MN$)、 DNR [$DNR = (2,6 - DMN + 2,7 - DMN)/1,5 - DMN$]、 $TNR_1 = 2,3,6 - TMN/(1,4,6 - TMN + 1,3,5 - TMN)$ 和 $TNR_2 = (1,3,7 - TMN + 2,3,6 - TMN)/(1,3,6 - TMN + 1,4,6 - TMN + 1,3,5 - TMN)$ 等参数^[37-40]。以上比值随着成熟度的增加逐渐增加,不过生物降解作用对烷基萜影响较大,可以导致比值降低^[41]。

笔者根据 DNR 与 TNR_2 定义及相应的成熟度转换公式, $R_{c4} = 0.49 + 0.09DNR$ 和 $R_{c5} = 0.4 + 0.6 TNR_2$, 和田河气田轻质原油的成熟度分布范围分别为 $0.76\% \sim 0.92\%$ 和 $0.71\% \sim 0.85\%$, 成熟度明显低于甲基菲系列和金刚烷系列参数所得结果。根据前人研究生物降解作用对烷基萘系列的分布和组成影响可知, 遭受轻微生物降解作用的原油中 $1,7-DMN$ 、 $1,4-DMN$ 和 $2,3-DMN$ 的丰度相对较高, 而 $2,7-DMN$ 、 $2,6-DMN$ 和 $1,5-DMN$ 的丰度相对较低; $1,3,6-TMN$ 丰度最高, $1,4,6-TMN$ 、 $1,3,5-TMN$ 和 $2,3,6-TMN$ 的丰度相当。在遭受中等程度生物降解原油中 $2,7-DMN$ 和 $2,6-DMN$ 的丰度下降, 而 $1,5-DMN$ 的丰度则有所升高。生物降解作用可以解释烷基萘参数计算成熟度低于其他成熟度参数的计算值。

4 油源启示

前面已述, 石炭系烃源岩有机质类型处于腐殖型或者混合型, 有机成熟度分布区间为 $0.65\% \sim 0.87\%$, 处于低成熟-成熟阶段, 无论有机质类型还是成熟度石炭系均不能成为和田河气田轻质油的母源。寒武系烃源岩的 R_o 值分布为 $1.65\% \sim 2.32\%$, 处于高成熟-过成熟阶段^[15-16], 综合有机质类型和成熟度信息可以初步判定为寒武系来源。

结合生物标志物谱图分析, 和田河气田轻质油的甾、萜烷谱图有别于麦盖提西部的巴仕托原油, 是一个独立的原油族群^[42]。轻质原油与该区典型烃源岩的生物标志物特征在甾烷分布特征、 C_{28} 甾烷的相对含量、孕甾烷系列发育程度、藿烷系列化合物分布中 C_{21} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷比值、 C_{24} 四环萜烷相对含量以及伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷均显示和田河气田凝析油与寒武系烃源岩有更强的亲缘关系而非石炭系烃源岩(图6, 图7)。因此, 认为和田河轻质油具有与寒武系基本一致的组成特征, 是典型海相原油的特征。

同时, 前人对和田河气田天然气研究得出干燥系数为 $0.95 \sim 0.99$, 为成熟度很高的干气。根据反映古生界腐泥型烃源岩生成的天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 R_o 关系的经验公式, 测算的和田河气田天然气成熟度(R_o)分布区间为 $2.17\% \sim 2.79\%$, 属于过成熟度的腐泥型天然气, 其烃源岩只能是寒武系

烃源岩^[43-44]。因此, 和田河轻质原油可能与天然气同源均来自寒武系烃源岩。

5 结论

1) 根据和田河轻质油原油密度等物理性质和轻烃庚烷值与异庚烷值、甲基双金刚烷参数、甲基菲参数、甲基二苯并噻吩、 $Ts/(Ts + Tm)$ 等成熟度参数, 得出和田河轻质油处于高成熟阶段, 即凝析油阶段。

2) 饱和烃色谱显示和田河气田轻质油遭受轻微的生物降解, 生物降解作用导致烷基萘类成熟度参数测得结果偏低。而甾烷成熟度参数 C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 达到演化平衡终点之后会随着成熟度的增加会减小, 因此在判断生物降解和高成熟度时上述指标慎用, 而金刚烷、甲基菲参数、甲基二苯并噻吩和 $Ts/(Ts + Tm)$ 可以有效使用。

3) 结合研究区源岩成熟度特征, 并与该地区露头 and 岩心烃源岩中甾、萜烷类生物标志化合物对比, 得出和田河轻质油与天然气具有共同的来源, 即来自寒武系烃源岩。

致谢: 感谢中国石化西北油田分公司陈跃高工的野外指导。中国石油大学地球化学实验室朱雷老师负责样品的前处理, 师生宝老师负责气相色谱质谱检测。审稿人对文章提出的建设性意见, 在此一并谢忱!

参 考 文 献

- [1] 周新源, 杨海军, 李勇, 等. 中国海相油气田勘探实例之七: 塔里木盆地和田河气田的勘探与发现[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 55-62.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Li Yong, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 7): Hotanhe gas field in Tarim basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3): 55-62.
- [2] Wang Zhaoming, Wang Qinghua, Zhao Mengjun, et al. Characteristics, genesis and accumulation history of natural gas in Hetianhe gasfield, Tarim Basin, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(S1): 84-95.
- [3] 秦胜飞, 邹才能, 戴金星, 等. 塔里木盆地和田河气田水溶气成藏过程[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 282-288.
Qin Shengfei, Zou Caineng, Dai Jinxing, et al. Water-soluble gas accumulation process of Hetianhe gasfield in Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,

- 33(3):282-288.
- [4] 秦胜飞,李梅,戴金星,等.塔里木盆地和田河气田天然气裂解类型[J].石油与天然气地质,2005,26(4):455-460.
Qin Shengfei, Li Mei, Dai Jinxing, et al. Types of cracking gas in Hetianhe gas field in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4):455-460.
- [5] 李政,张林晔,沈忠民,等.准噶尔盆地车排子凸起轻质油母源及充注方向[J].石油实验地质,2011,33(4):419-423.
Li Zheng, Zhang Linye, Shen Zhongmin, et al. Source and migrating direction of light oil in Chepaizi Uplift, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4):419-423.
- [6] 赵孟军,曾凡刚,秦胜飞,等.塔里木发现和证实两种裂解气[J].天然气工业,2001,21(1):35-38.
Zhao Mengjun, Zeng Fangang, Qin Shengfei, et al. Two pyrolytic gases found and proved in Talimu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1):35-38.
- [7] 陈海霞,余高华,黄光辉. TSR 反应及其与和田河气田东西部差异的关系[J]. 内蒙古石油化工,2008,(2):127-128.
Chen Haixia, Yu Gaohua, Huang Guanghui. Thermochemical sulfate reduction reaction and its correlation with the components of natural gas, Hetianhe gasfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, (2):127-128.
- [8] 秦胜飞,贾承造,李梅.和田河气田东西部差异及原因[J].石油勘探与开发,2002,10(5):16-18.
Qin Shengfei, Jia Chengzao, Li Mei. The difference in geochemical characteristics of natural gases between eastern and western parts in Hetianhe gas field of Tarim basin and its origin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 10(5):16-18.
- [9] 周路,赵文智,何登发.塔里木盆地麦盖提斜坡油气地质与勘探[M].北京:石油工业出版社,2006:100-120.
Zhou Lu, Zhao Wenzhi, He Dengfa. Petroleum geology and exploration Markit slop, Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:100-120.
- [10] 赵文智,张光亚,李洪辉,等.被动大陆边缘演化与油气地质-以塔西南地区为例[M].北京:石油工业出版社,2007:208-218.
Zhao Wenzhi, Zhang Guangya, Li Honghui, et al. Passive continental margin evolution and petroleum geology-a case study in Southwest Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:208-218.
- [11] 邵志兵,吕海涛,耿锋.塔里木盆地麦盖提地区石炭系油藏地球化学特征[J].石油与天然气地质,2010,31(1):84-90.
Shao Zhibing, Lü Haitao, Geng Feng. Geochemical characteristics of the Carboniferous oil pools in Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):84-90.
- [12] 张仲培,刘士林,杨子玉,等.塔里木盆地麦盖提斜坡构造演化及油气地质意义[J].石油与天然气地质,2011,32(6):909-919.
Zhang Zhongpei, Liu Shilin, Yang Ziyu, et al. Tectonic evolution and its petroleum geological significances of the Maigaiti Slope, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6):909-919.
- [13] 吕海涛,张仲培,邵志兵,等.塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J].石油与天然气地质,2010,31(1):76-83,90.
Lü Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the Early Paleozoic palaeouplifts in Bachu-Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):76-83, 90.
- [14] 李洪辉,邬光辉,王洪江,等.塔里木盆地和田河气田周缘构造演化、成藏与勘探领域[J].现代地质,2009,23(4):587-594.
Li Honghui, Wu Guanghui, Wang Hongjiang, et al. Structural evolution, reservoir-forming and exploration field of Peripheral area of the Hetianhe gas field in Tarim Basin[J]. Geosciences, 2009, 23(4):587-594.
- [15] 王招明,王清华,王媛.塔里木盆地和田河气田成藏条件及控制因素[J].海相油气地质,2000,5(1-2):124-132.
Wang Zhaoming, Wang Qinghua, Wang Yuan. Accumulation conditions and controlling factors of Hetianhe gas field, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(1-2):124-132.
- [16] 张国成,王廷栋,徐志明,等.塔里木盆地和田河气田碳酸盐岩储层的多期次多来源油气聚集特征[J].地学前缘,2008,7(增1):239-248.
Zhang Guocheng, Wang Tingdong, Xu Zhiming, et al. The accumulation characteristics of multiphase and multisource oil and gas in highly matured Ordovician carbonate reservoirs in Hetianhe gas field, Tarim Basin, West China[J]. Earth science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2008, 7(z1):239-248.
- [17] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1983, 47(2):303-316.
- [18] 王培荣,徐冠军,张大江,等.常用轻烃参数正、异庚烷值应用中的问题[J].石油勘探与开发,2010,37(1):121-128.
Wang Peirong, Xu Guanjun, Zhang Dajiang, et al. Problems with application of heptane and isoheptane values as light hydrocarbon parameters[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1):121-128.
- [19] Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum[J]. Science, 1987, 237(4814):514-517.
- [20] Wingert W S. GC-MS analysis of diamondoid hydrocarbons in smackover petroleum[J]. Fuel, 1992, 71(1):37-43.
- [21] Fărcașiu D, Ghenciu A, Li J Q. The Mechanism of conversion of saturated hydrocarbons catalyzed by sulfated metal oxides: reaction of adamantane on sulfated zirconia[J]. Journal of Catalysis, 1996, 158(1):116-127.
- [22] Grice K, Alexander R, Kagi R I. Diamondoid hydrocarbon ratios as indicators of biodegradation in Australian crude oils[J]. Or-

- ganic Geochemistry, 2000, 31(1): 67–73.
- [23] Dahl J E, Moldowan J M, Peters K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking[J]. *Nature*, 1999, 399: 54–57.
- [24] Chen J H, Fu J M, Sheng G Y, et al. Diamondoid hydrocarbon ratios: novel maturity indices for highly mature crude oils[J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 25(3): 179–190.
- [25] Li Jinggui, Paul Philp, Cui Mingzhong. Methyl diamantane index (MDI) as a maturity parameter for Lower Palaeozoic carbonate rocks at high maturity and overmaturity[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(4): 267–272.
- [26] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [C] // In *Advances in organic geochemistry*. New York, 1981: 504–512.
- [27] Radke M, Welte D H, Willsch H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 1–10.
- [28] Schou L, Myhr M B. Sulfur aromatic compounds as maturity parameters[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13(1–3): 61–66.
- [29] Dzou L I P, Noble R A, Senftle J T. Maturation effects on absolute biomarker concentration in a suite of coals and associated vitrinite concentrates[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 23(7): 681–697.
- [30] 李景贵. 海相碳酸盐岩二苯并噻吩类化合物成熟度参数研究进展与展望[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 154–157.
- Li Jinggui. Research development and prospect of maturity parameters of methylated dibenzothiophenes in marine carbonate rocks[J]. *Acta Sedimentology Sinica*, 2000, 18(3): 154–157.
- [31] 罗健, 程克明, 付立新. 等. 烷基二苯并噻吩-炔源岩热演化新指标[J]. *石油学报*, 2011, 22(3): 39–43.
- Luo Jian, Cheng Keming, Fu Lixin, et al. Alkylate dibenzothiophene index-a new method to assess thermal maturity of source rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 22(3): 39–43.
- [32] Chakhmakhchev A, Suzuki M, Takayama K. Distribution of alkylated dibenzothiophenes in petroleum as a tool for maturity assessments[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7–8): 483–489.
- [33] Wang T G, He Faqi, Wang Chunjiang, et al. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe Oil-field, Tarim Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(11): 1637–1646.
- [34] 张敏, 张俊. 水洗作用对油藏中烃类组成的影响[J]. *地球化学*, 2000, 3: 287–292.
- Zhang Min, Zhang Jun. Effect of water washing on hydrocarbon compositions of petroleum sandstone reservoir in Tarim Basin, NW China[J]. *Geochemica*, 2000, 3: 287–292.
- [35] Lafargue E, Barker C. Effect of water washing on crude oil compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(3): 263–276.
- [36] Van Aarsen Ben G K, Bastow Trevor P, Alexander Robert, et al. Distributions of methylated naphthalenes in crude oils: indicators of maturity, biodegradation and mixing[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(10): 1213–1227.
- [37] 李美俊, 王铁冠. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(6): 606–623.
- Li Meijun, Wang Tieguan. The generating mechanism of methylated naphthalene series in crude oils and the application of their maturity parameters [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(6): 606–623.
- [38] Alexander R, Kagi R I, Rowland S J, et al. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some ancient sediments and petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(2): 385–395.
- [39] Volkman John K, Alexander Robert, Kagi Robert I. Biodegradation of aromatic hydrocarbons in crude oils from the Barrow Sub-basin of Western Australia [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 619–632.
- [40] 袁莉, 包建平. 生物降解作用对原油中烷基萘分布与组成特征的影响[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 512–517.
- Yuan Li, Bao Jianping. The effect of biodegradation on the distribution and composition of alkylnaphthalene series biodegraded crude oils [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(5): 512–517.
- [41] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993, 98–100.
- [42] Cui Jingwei, Wang Tieguan, Li Meijun. Geochemical characteristics and oil family classification of crude oils from the Markit Slope in the southwest of the Tarim Basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2011, 30(3): 359–365.
- [43] Huang D F, Liu B Q, Wang T D, et al. Genetic types of natural gases and their maturity discrimination in the east of Tarim Basin [J]. *Science in China-Ser D*, 1996, 39(6): 659–669.
- [44] 赵孟军. 塔里木盆地和田河气田天然气的特殊来源及非烃组成的成因[J]. *地质论评*, 2002, 48(5): 480–486.
- Zhao Mengjun. Special source of the natural gases of Hotan River gas Field and the origin of its non-hydrocarbon gases[J]. *Geological Review*, 2002, 48(5): 480–486.

(编辑 张亚雄)