

## 准噶尔盆地莫索湾地区

# 原油地球化学特征及成因分析

李二庭<sup>1,2</sup>, 陈俊<sup>1,2</sup>, 曹剑<sup>3</sup>, 魏霞<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>1,2</sup>, 张晓刚<sup>1,2</sup>, 王海静<sup>1,2</sup>

1. 新疆砾岩油藏实验室, 新疆克拉玛依 834000;

2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000;

3. 南京大学, 南京 210003

**摘要:**为明确准噶尔盆地莫索湾地区原油成因及影响原油性质差异的控制因素,揭示研究区油气成藏规律,开展了原油饱和烃生物标志物和单体烃碳同位素组成分析,以及混源油模拟配比实验。莫索湾地区盆5井区原油碳同位素偏重,Pr/Ph值更大(1.4~1.9),金刚烷异构化指标偏高,说明盆5井区原油成熟度高于盆参2井区原油,且水体沉积环境更偏氧化性。莫索湾地区原油C<sub>7</sub>轻烃以甲基环己烷组分占优势,含量大于40%, $\alpha\alpha\alpha$ 构型的规则甾烷分布中均以C<sub>29</sub>规则甾烷含量占优势,相对含量大于40%,表明其生烃母质均以陆相偏腐殖型为主。盆5井区和盆参2井区原油正构烷烃碳同位素值组成及分布曲线基本相同,表明其来源整体一致,且与典型下乌尔禾组烃源岩整体较为相似;但下乌尔禾组烃源岩不同碳数正构烷烃碳同位素值跨度较大,达4.6‰,而莫索湾地区原油中不同碳数正构烷烃碳同位素值跨度有所差异,分布在2.2‰~3.0‰之间,认为主要是不同期次充注原油比例不同造成的。混源油生物标志物定量计算结果表明,莫索湾地区原油主要来源于晚期高成熟下乌尔禾组烃源岩,混有早期成熟风城组烃源岩贡献,其中,盆5井区和盆参2井区原油中高成熟下乌尔禾组烃源岩贡献分别大于80%和60%。混源比例不同是造成莫索湾地区不同区域原油地球化学特征表现差异的主要原因。

**关键词:**金刚烷;单体烃碳同位素;生物标志物;混源油;莫索湾地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.11

文献标识码:A

## Geochemical characteristics and genetic analysis of crude oils in Mosuowan area, Junggar Basin

LI Erting<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>, CAO Jian<sup>3</sup>, WEI Xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaogang<sup>1,2</sup>, WANG Haijing<sup>1,2</sup>

1. Xinjiang Laboratory of Petroleum Reserve in Conglomerate, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Research Institute of Experiment and Testing, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210003, China

**Abstract:** Analysis of the biomarkers of saturated hydrocarbon and related compound specific carbon isotopes of crude oils were carried out for the research of origin of oils and controlling factors of oil properties in the Mosuowan area of the Junggar Basin, and mixed-source oil simulation was also carried out to reveal hydrocarbon accumulation in the study area. The carbon isotope of crude oil in the Pen 5 well block is relatively heavy, the Pr/Ph value is higher, between 1.4 and 1.9, and the index of adamantane isomerization is greater, indicating that the oil maturity of the Pen 5 well block is higher than that of the Pencan 2 well and had a more oxidative sedimental environment. The C<sub>7</sub> light hydrocarbons of oil of the Mosuowan area are dominated by methylcyclohexane, with a content over 40%, and the distributions of regular steranes are dominated by C<sub>29</sub> homologues with a content over 40%. Crude oils in the study area are thus indicated to be generated from terrestrial partial humus source rocks. The carbon isotope compositions and distribution of *n*-alkanes in the Pen 5 and Pencan 2 well blocks are similar, indicating that they were from the comparable sources, and they are generally similar to the source rocks in the Lower Wuerhe Formation. But the carbon isotope values of *n*-alkanes with different carbon numbers in the source rocks of the Lower Wuerhe Formation have a large span, reaching 4.6‰, while the carbon isotope values of *n*-alkanes with different carbon numbers of crude oil in the Mosuowan area have a smaller span, between 2.2‰ and 3.0‰. It is mainly caused by the different mixing ratio

收稿日期:2020-12-14;修订日期:2021-11-26。

作者简介:李二庭(1988—),男,博士,高级工程师,从事油气地球化学研究工作。E-mail:lierting@petrochina.com.cn。

基金项目:国家油气重大专项(2017ZX05001-004)和中国石油重大工程技术现场试验项目(2019F-33)资助。

of crude oil. The quantitative calculation results of biomarkers in mixed-source oil showed that crude oil in the Mosuowan area was mainly derived from the late high-maturity source rocks in the Lower Wuerhe Formation, mixed with those from the early mature source rocks in the Fengcheng Formation. Among them, the high-maturity source rocks in the Lower Wuerhe Formation have a relatively greater contribution to crude oil in the Pen 5 well block, around 80%, and contribute about 60% to crude oil in the Pencan 2 well block. As a result, it is concluded that different proportions of mixed sources are the main reason which caused differences in the geochemical characteristics of crude oil in the Mosuowan area.

**Key words:** diamondoid; carbon isotopic compositions of monomer hydrocarbon; biomarker; oil of mixed sources; Mosuowan area; Junggar Basin

莫索湾地区(凸起)位于准噶尔盆地腹部古尔班通古特沙漠腹地,构造区划上位于准噶尔盆地中央坳陷二级构造单元马桥凸起,东邻东道海子凹陷,西连盆1井西凹陷,南邻阜康凹陷,北接莫北凸起,为典型的坳中凸,区域构造位置非常有利(图1)。该凸起是在石炭系上、经二叠纪构造运动发育起来的大型隆起,在三叠纪—中侏罗世稳定埋藏,晚侏罗世大规模抬升而遭受剥蚀,白垩纪—古近纪再次稳定沉降埋藏,在新近纪—第四纪开始向南倾斜。根据区域构造特征,莫索湾地区可分为盆5井区和盆参2井区,目前发现油气主要分布于侏罗系三工河组( $J_3s$ )储层中,其中,盆5井区勘探成果显著,多口井发现工业油气流,日产油达20 t。前期研究发现,盆5井区和盆参2井区原油性质及地球化学特征存在一定差异。前人对腹部地区油气来源进行研究后认为,该区侏罗系油气藏第一次成藏是在早白垩世,由来源于风城组( $P_1f$ )烃源岩的油气调整而来;第二次成藏是在晚

白垩世—第三纪,来源于下乌尔禾组( $P_2w$ )烃源岩的原生油气藏<sup>[1-2]</sup>,并且近生烃凹陷的地区,源于下乌尔禾组烃源岩的晚期原油所占比例较高,而远离生烃凹陷的地区,来源于风城组烃源岩的早期原油所占比例较高,从而造成不同区块原油存在差异<sup>[3-4]</sup>。也有研究认为,莫索湾地区盆5井区和盆参2井区原油差异主要是油气来源于不同的生烃凹陷造成的<sup>[5-6]</sup>。

本文通过对比分析莫索湾地区盆5井区和盆参2井区原油物性、地球化学组成特征和单体烃碳同位素特征,结合混源油模拟配比实验,探讨不同区块原油差异成因及来源,揭示油气成藏规律,为勘探目标区的整体评价和优选提供参考。

## 1 样品与实验

采集了莫索湾地区24口井侏罗系储层原油共29个,风南1井风城组烃源岩和金探1井下乌尔禾组烃源岩,其中,风南1井位于玛湖地区西北部

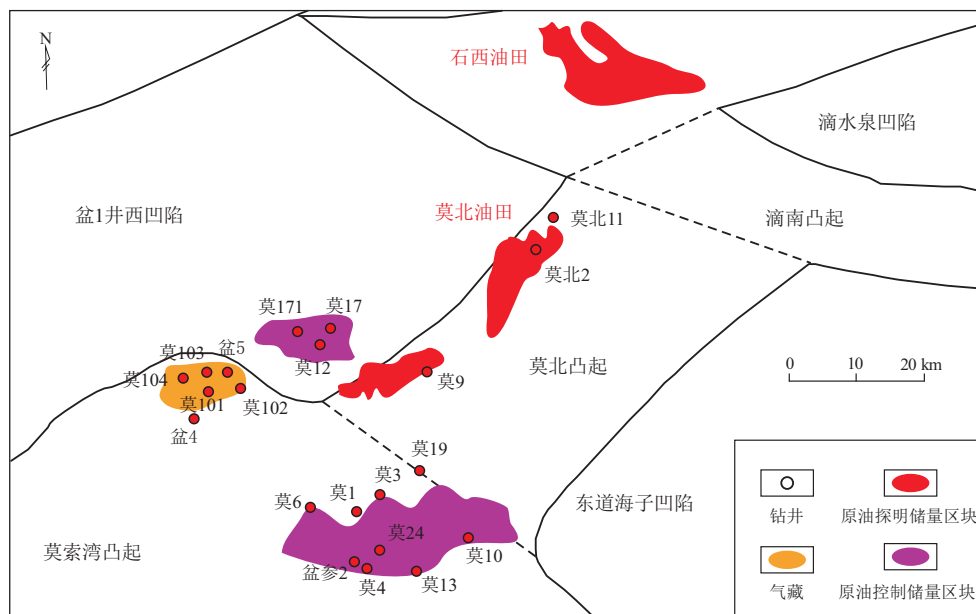


图1 准噶尔盆地莫索湾地区及采样井位置

Fig.1 Sampling wells in Mosuowan area, Junggar Basin

乌夏断裂带,金探1井位于中拐凸起<sup>[7]</sup>。风南1井烃源岩有机碳含量(TOC)为1.82%,氢指数( $I_H$ )为505 mg/g,热解峰温( $T_{max}$ )为440℃;金探1井烃源岩TOC为3.37%, $I_H$ 值为550 mg/g, $T_{max}$ 为450℃。原油样品采用同位素质谱仪MAT-252进行全油碳同位素分析,采用氧化铝/硅胶进行分离获得饱和烃,对饱和烃组分进行色谱GC和GC-MS分析。原油和烃源岩抽提物中饱和烃组分采用尿素络合技术获得正构烷烃单体,进行碳同位素分析(GC-IRMS),获得样品单体正构烷烃碳同位素组成特征。单体正构烷烃碳同位素分析采用Agilent 6890-Isoprime型GC-IRMS联用仪,色谱柱为HP-5MS柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);柱温条件为:初始温度80℃,恒温1.5 min,以20℃/min速率升温至130℃,再以4℃/min速率升温至290℃,恒温15 min。仪器碳同位素校正标准样品为购于Indiana大学的正构烷烃混合标样( $nC_{12}$ — $nC_{35}$ ),平行样碳同位素测定结果的偏差小于0.5‰。

混源油模拟配比实验:端元油分别选择来源于下乌尔禾组烃源岩的前哨1井高成熟原油(密度为0.7553 g/cm<sup>3</sup>,凝固点为-15℃,含蜡1.52%)和来源于风城组烃源岩的基003井成熟原油(密度为0.8590 g/cm<sup>3</sup>,凝固点为22℃,含蜡10.7%);前哨1井和基003井原油混合比例设置为80:20,60:40,40:60,20:80,混合原油开展GC-MS生物标志物定量测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原油物性特征

莫索湾凸起原油类型多样,分布有凝析油、轻质油和正常油,盆5井区与盆参2井区侏罗系原油物性差异较大。盆5井区原油密度整体较轻,以轻

质油和凝析油为主,密度为0.7550~0.8664 g/cm<sup>3</sup>,50℃黏度为1.0~38.4 mPa·s,非烃+沥青质含量为3.56%~12.51%,主体小于10%,平均7.96%;盆参2井区原油密度相对较重,以轻质油和正常油为主,密度为0.8406~0.8926 g/cm<sup>3</sup>,50℃黏度为1.5~52.1 mPa·s,非烃+沥青质含量为5.31%~19.79%,主体大于10%,平均13.01%。

### 2.2 原油饱和烃地球化学组成特征

莫索湾凸起盆5井区和盆参2井区原油地球化学组成具有明显的差异(图2-4),表明2个区块原油来源不同。

盆5井区原油全油碳同位素整体偏重,分布在-29.39‰~-28.55‰之间,Pr/Ph分布在1.41~1.87之间,均值为1.62,Pr/ $nC_{17}$ 和Ph/ $nC_{18}$ 分别为0.35~0.51和0.15~0.40;盆参2井区原油全油碳同位素分布在-30.60‰~-29.58‰之间,Pr/Ph分布在1.02~1.46之间,均值为1.24,Pr/ $nC_{17}$ 和Ph/ $nC_{18}$ 分别为0.32~0.87和0.25~0.87(图2)。Pr/Ph可用于反映烃源岩有机相及母质水体沉积环境<sup>[8-10]</sup>。Pr/Ph值越大,反映母质沉积水体的氧化性越强,反之,母质沉积水体的还原性越强。但前人的研究表明,Pr/Ph、Pr/ $nC_{17}$ 和Ph/ $nC_{18}$ 值大小也与成熟度有关,Pr/Ph值随着成熟度升高逐渐增大,Pr/ $nC_{17}$ 和Ph/ $nC_{18}$ 值随成熟度的升高逐渐降低<sup>[11]</sup>。盆5井区原油Pr/Ph值整体大于盆参2井区,Pr/ $nC_{17}$ 和Ph/ $nC_{18}$ 值整体较低,可能是由于该区原油成熟度整体较高造成的,其沉积水体更偏氧化性。

轻烃是原油的重要组分,可用于油源对比、原油运移方向等研究<sup>[12-13]</sup>。特别是C<sub>7</sub>轻烃,主要为正庚烷、甲基环己烷和二甲基环戊烷,其中,正庚烷代表藻类和细菌来源,甲基环己烷代表高等植物来源,而二甲基环戊烷指示水生生物类的脂化合物来

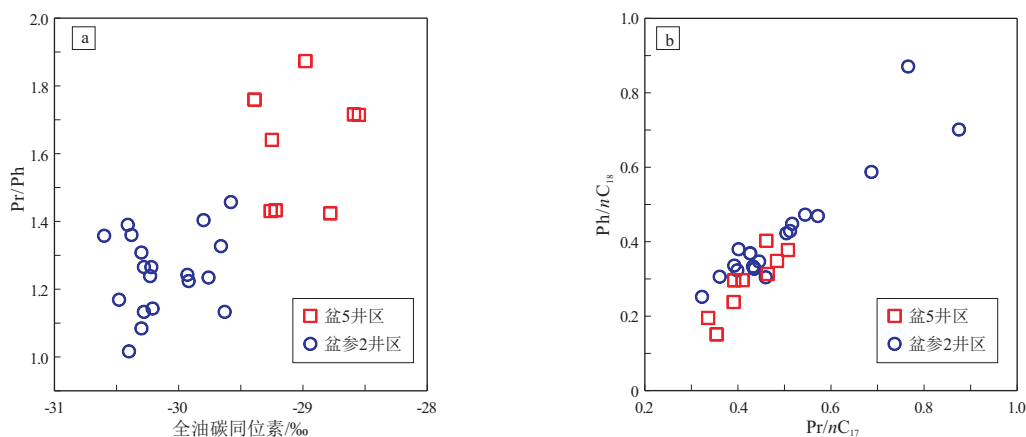


图2 准噶尔盆地莫索湾地区原油碳同位素及链烷烃组成分布

Fig.2 Distribution of carbon isotopes and paraffin composition of crude oil in Mosuowan area, Junggar Basin

源, 利用正庚烷、甲基环己烷和二甲基环戊烷的相对含量, 可以判别腐殖型和腐泥型油气来源<sup>[14-16]</sup>。如王廷栋等<sup>[17]</sup>发现四川盆地陆相来源油气藏 C<sub>4</sub>—C<sub>7</sub>轻烃以异构烷烃含量占优势, 海相来源油气藏 C<sub>4</sub>—C<sub>7</sub>轻烃以正构烷烃含量占优势; 胡惕麟等<sup>[18]</sup>提出当原油甲基环己烷指数大于 50%, 其生烃母质为腐殖型, 当原油甲基环己烷指数小于 50% 时, 其生烃母质类型为腐泥型。从莫索湾地区侏罗系储层原油轻烃特征可以看出, 盆 5 井区原油中甲基环己烷组分含量分布在 43.20%~58.05% 之间, 正庚烷组分含量分布在 30.38%~46.20% 之间 (图 3a); 盆参 2 井区原油中甲基环己烷组分含量分布在 46.03%~58.51% 之间, 正庚烷组分含量分布在 24.22%~43.12% 之间 (图 3b)。研究区原油中甲基环己烷组分占优势, 表明其生烃母质均以偏腐殖型为主。

三环萜烷、藿烷和甾烷系列是研究原油油源的重要指标<sup>[9]</sup>。伽马蜡烷主要是半咸水—盐湖沉积物, 在淡水沉积环境烃源岩中含量较低, 可采用伽

马蜡烷指数表征烃源岩沉积环境<sup>[19]</sup>。Ts/Tm 比值主要用于表征原油成熟度<sup>[20]</sup>, 成熟度越高, Ts/Tm 值越大。前人研究表明,  $\alpha\alpha\alpha C_{27}$  规则甾烷可能来源于水生浮游生物, 而  $\alpha\alpha\alpha C_{29}$  规则甾烷可能来源于陆源生物,  $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 规则甾烷的相对含量可用于表征母质类型及相对贡献<sup>[21-22]</sup>, 且 C<sub>29</sub> 规则甾烷不同地质构型的比值可判断烃源岩成熟度<sup>[23]</sup>。盆 5 井区原油中 Ts/Tm 值分布在 0.38~0.79 之间;  $\gamma/C_{30}$  藿烷值分布在 0.10~0.25 之间;  $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 规则甾烷分布中以  $\alpha\alpha\alpha C_{29}$  规则甾烷含量占优势, 分布在 36.63%~52.56% 之间, 均值为 45.96%, 主要呈反 L 型和上升型分布; C<sub>29</sub> 甾烷  $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  与 C<sub>29</sub> 甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$  参数分别为 0.48~0.54 和 0.59~0.63 (图 4)。盆参 2 井区原油中 Ts/Tm 值分布在 0.20~0.41 之间;  $\gamma/C_{30}$  藿烷值分布在 0.06~0.28 之间;  $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 规则甾烷分布中以  $\alpha\alpha\alpha C_{29}$  规则甾烷含量占优势, 分布在 48.17%~55.10% 之间, 均值为 51.33%, 主要呈上升型分布; C<sub>29</sub> 甾烷  $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  与 C<sub>29</sub> 甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$

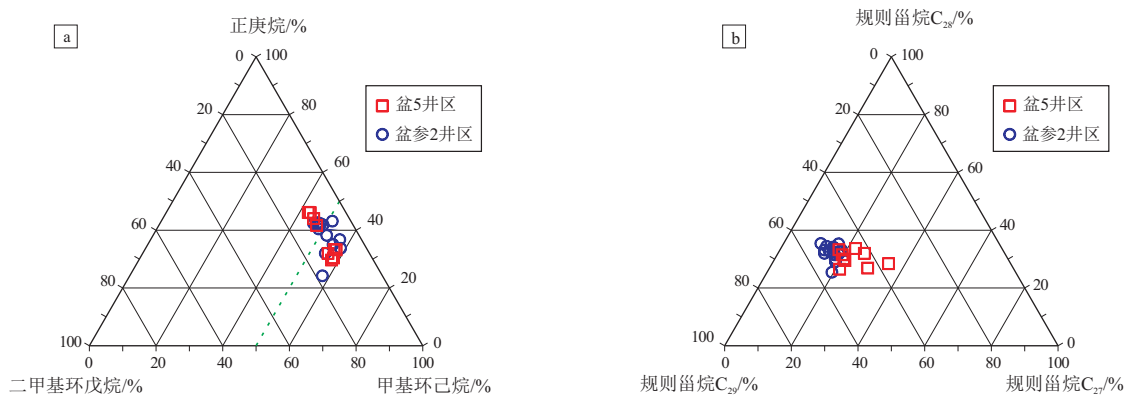


图 3 准噶尔盆地莫索湾地区原油 C<sub>7</sub>轻烃及规则甾烷组成分布

Fig.3 Composition of C<sub>7</sub> light hydrocarbons and regular steranes of crude oil in Mosuowan area, Junggar Basin

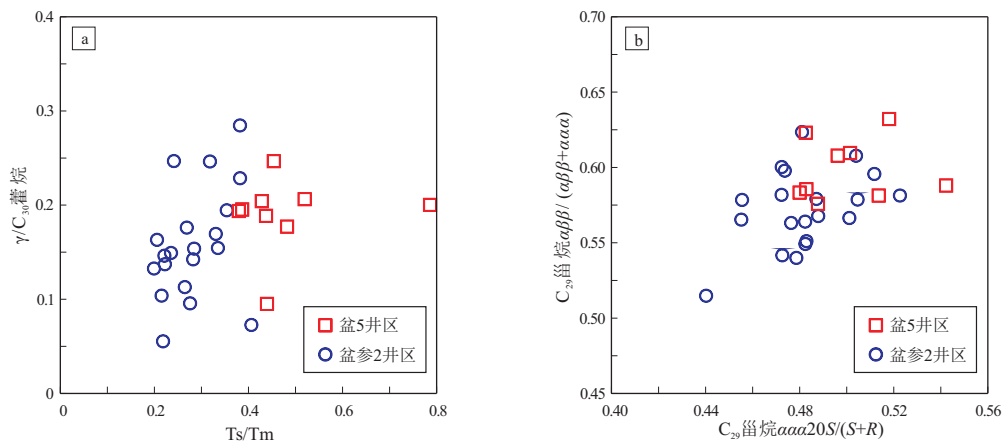


图 4 准噶尔盆地莫索湾地区原油生物标志物组成特征

Fig.4 Biomarker composition of crude oil in Mosuowan area, Junggar Basin

参数分别为 0.44~0.52 和 0.51~0.62(图 4)。从生物标志物组成特征可以看出,盆 5 井区原油成熟度整体高于盆参 2 井区原油,两者的母质来源具有一定的差异。

典型风城组烃源岩 Pr/Ph 通常小于 1.00,反映了盐湖相的沉积环境,Pr/nC<sub>17</sub>和 Ph/nC<sub>18</sub>一般都大于 0.50;Ts 含量极低,Ts/Tm 值一般小于 0.20;γ/C<sub>30</sub>藿烷值一般大于 0.20;αααC<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub>规则甾烷分布中以 αααC<sub>29</sub>规则甾烷含量占优势。典型下乌尔禾组烃源岩 Pr/Ph 的比值一般介于 1.00~2.00 之间,Pr/nC<sub>17</sub>和 Ph/nC<sub>18</sub>分布在 0.30~0.50 之间;Ts 含量较高,Ts/Tm 值一般大于 0.20;γ/C<sub>30</sub>藿烷值一般小于 0.20,αααC<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub>规则甾烷分布中以 αααC<sub>29</sub>规则甾烷含量占优势。从原油地球化学组成上看,莫索湾地区原油与典型下乌尔禾组烃源岩地球化学特征较为相似,表明盆 5 井区和盆参 2 井区原油主要来源于下乌尔禾组烃源岩。

### 2.3 原油金刚烷组成特征

金刚烷化合物具有稳定的类金刚石结构,具有很强的热稳定性和抗生物降解能力,可用于油气成熟度评价、有机质类型判识及油气运移方向研究等<sup>[24-27]</sup>。对于高熟油气来说,常用的 C<sub>29</sub>甾烷 αββ/(αββ+ααα)与 C<sub>29</sub>甾烷 ααα20S/(S+R)参数已达到平衡值,难以有效判断成熟度大小。针对于此,前人建立了金刚烷异构化指标评价原油和烃源岩的成熟度,认为随着热演化程度的增加,异构化

指标增大<sup>[28]</sup>,并利用金刚烷浓度指标判别油气来源。图 5 是莫索湾地区原油金刚烷异构化指标和浓度指标特征,从图 5 中可以看出,盆 5 井区和盆参 2 井区不仅成熟度存在明显差异,来源也不同。盆 5 井区原油金刚烷异构化指标 MAI [1-甲基单金刚烷/(1-甲基单金刚烷+2-甲基单金刚烷)]值分布在 0.50~0.69 之间,DMAI-1 [1,3-二甲基单金刚烷/(1,3-二甲基单金刚烷+1,2-二甲基单金刚烷)]值分布在 0.53~0.65 之间,EAI [1-乙基单金刚烷/(1-乙基单金刚烷+2-乙基单金刚烷)]值分布在 0.24~0.30 之间,MDI [4-甲基双金刚烷/(4-甲基双金刚烷+1-甲基双金刚烷+3-甲基双金刚烷)]值分布在 0.34~0.51 之间;盆参 2 井区原油金刚烷异构化指标 MAI 值分布在 0.41~0.50 之间,DMAI-1 值分布在 0.44~0.54 之间,EAI 值分布在 0.21~0.27 之间,MDI 值分布在 0.26~0.37 之间,表明盆 5 井区原油成熟度高于盆参 2 井区原油。

盆 5 井区原油金刚烷浓度指标 A/1-MA(单金刚烷含量/1-甲基单金刚烷含量)值分布在 0.31~0.37 之间,1-MA/1,3-DMA(1-甲基单金刚烷含量/1,3-二甲基单金刚烷含量)值分布在 0.96~1.47 之间,A/MA<sub>s</sub>(单金刚烷含量/甲基单金刚烷类总含量)值分布在 0.16~0.22 之间,MA<sub>s</sub>/DMA<sub>s</sub>(甲基单金刚烷类总含量/二甲基单金刚烷类总含量)值分布在 0.44~0.64 之间;盆参 2 井区原油金刚烷浓度指标 A/1-MA 值分布在 0.47~0.83 之间,

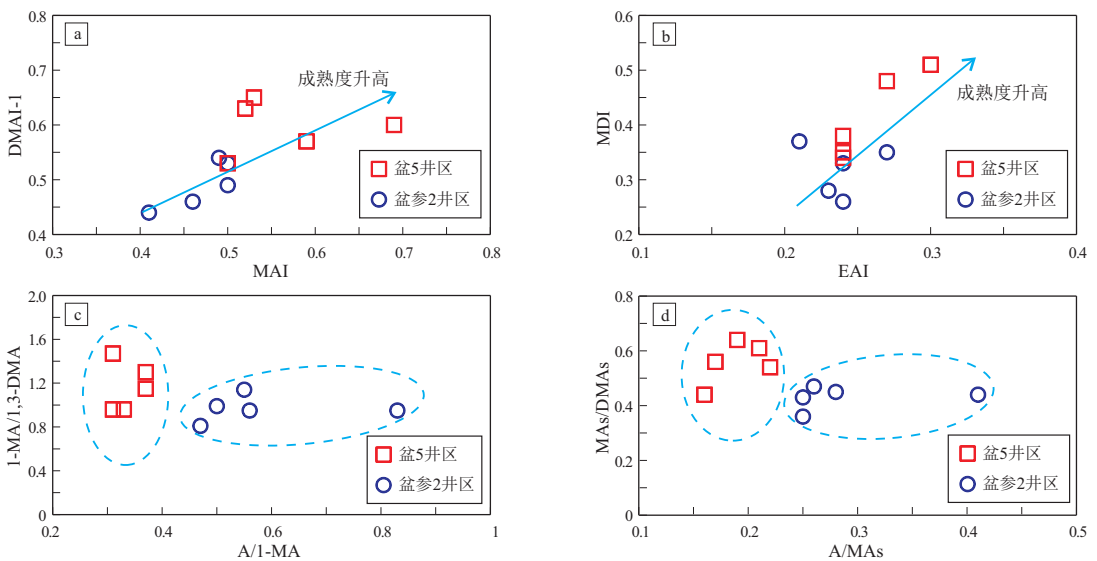


图 5 准噶尔盆地莫索湾地区原油金刚烷异构化指标(a,b)和浓度指标(c,d)

DMAI-1=1,3-二甲基单金刚烷/(1,3-二甲基单金刚烷+1,2-二甲基单金刚烷);MAI=1-甲基单金刚烷/(1-甲基单金刚烷+2-甲基单金刚烷);MDI=4-甲基双金刚烷/(4-甲基双金刚烷+1-甲基双金刚烷+3-甲基双金刚烷);EAI=1-乙基单金刚烷/(1-乙基单金刚烷+2-乙基单金刚烷);A 为单金刚烷含量;1-MA 为 1-甲基单金刚烷含量;1,3-DMA 为 1,3-二甲基单金刚烷含量;MA<sub>s</sub> 为甲基单金刚烷类总含量;DMA<sub>s</sub> 为二甲基单金刚烷类总含量

1-MA/1,3-DMA 值分布在 0.81 ~ 1.14 之间, A/MAs 值分布在 0.25 ~ 0.41 之间, MAs/DMA 值分布在 0.36 ~ 0.47 之间, 表明其来源不同。综合前文所述, 认为造成盆 5 井区与盆参 2 井区原油差异的原因主要是由于混源比例不同造成的。

### 2.4 原油单体烃碳同位素组成特征

在油气地球化学领域, 稳定碳同位素分析技术在油源对比、烃源岩的沉积环境和成熟度等研究领域得到了应用<sup>[29-30]</sup>。单体化合物测试方法的实现, 大大增强了追踪古环境中有机质来源和恢复古生物化学过程及沉积环境的能力, 为油源的精细对比研究提供了一种更加有效的方法<sup>[31-34]</sup>。图 6 为准噶尔盆地典型烃源岩及莫索湾凸起原油正构烷烃单体碳同位素组成特征图, 从图 6 中可以看出, 盆 5 井区和盆参 2 井区原油正构烷烃碳同位素组成及分布曲线基本相同, 表明其整体来源一致, 在  $nC_{12}$ — $nC_{32}$  范围正构烷烃单体碳同位素值主要介于  $-31.8‰$  ~  $-28.5‰$  之间, 随着正构烷烃碳数增

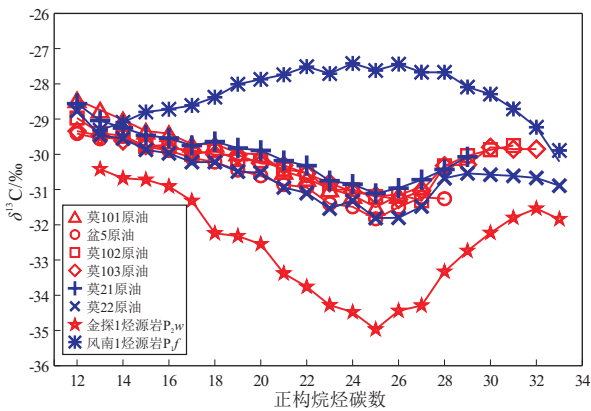


图 6 准噶尔盆地莫索湾地区原油与烃源岩中正构烷烃碳同位素组成特征

Fig.6 Carbon isotopic composition of *n*-alkanes in crude oil and source rocks in Mosuowan area, Junggar Basin

加, 呈先降低后升高的趋势, 在  $nC_{25}$  范围达到最低值, 与典型下乌尔禾组烃源岩整体较为相似。但下乌尔禾组烃源岩在  $nC_{12}$ — $nC_{32}$  范围正构烷烃单体碳同位素值主要介于  $-35.0‰$  ~  $-30.4‰$  之间, 不同碳数正构烷烃碳同位素值跨度较大, 达到  $4.6‰$ ; 而莫索湾地区原油中不同碳数正构烷烃碳同位素值跨度有所差异, 分布在  $2.2‰$  ~  $3.0‰$  之间, 认为可能是混源导致的。前人<sup>[1-2]</sup>研究认为, 该区侏罗系油气藏第一次成藏是在早白垩世, 由来源于风城组烃源岩的油气调整而来; 第二次是在晚白垩世—第三纪, 是主要来源于下乌尔禾组烃源岩的原生油气藏, 随着后期充注来源于下乌尔禾组烃源岩油气比例增大, 导致原油中不同碳数正构烷烃碳同位素值跨度有所差异。

### 2.5 混源油模拟配比实验

前哨 1 井端元油具有典型高成熟下乌尔禾组来源特征, 甾烷异构化指数  $C_{29}$  甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$  值为 0.51, 其 TIC 图中正构烷烃分布完整且表现为“前峰型”(图 7a), 未检出指示遭受降解的 25-降藿烷(图 7b), 未检出  $\beta$ -胡萝卜烷, Pr/Ph 为 1.73, 表明其为弱氧化的淡水环境; 三环萜烷  $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$  呈“山峰型”分布(图 7c), 表现为“高熟、无降解、一期充注”。基 003 井端元油具有典型成熟风城组来源特征, 甾烷异构化指数  $C_{29}$  甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$  值为 0.48, 其 TIC 图中基本不含正构烷烃, 具有明显“UCM”特征(图 7d), 检出指示严重生物降解的 25-降藿烷(图 7e), 表明其遭受过严重的次生降解; 检出丰富的  $\beta$ -胡萝卜烷, Pr/Ph 为 1.42, 表明其为弱还原咸化环境; 三环萜烷  $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$  呈“上升型”分布(图 7f), 表现为“成熟、降解、一期充注”。

基于混源油生物标志物定量分析, 建立了反映

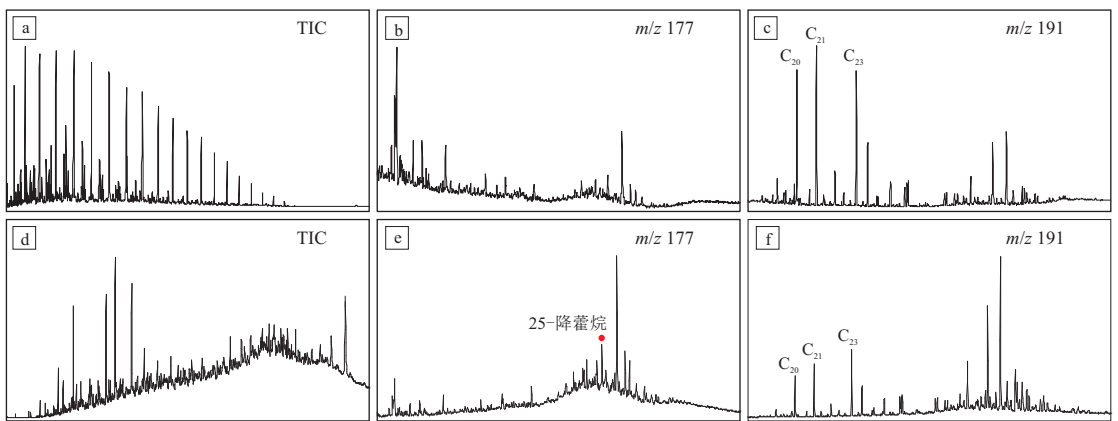


图 7 准噶尔盆地莫索湾地区前哨 1 井(a-c)和基 003 井(d-f)端元油质量色谱图

Fig.7 Chromatogram of oils from wells Qianshao-1(a-c) and Ji-003(d-f) in Mosuowan area, Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地莫索湾地区混源油比例判别参数

Table 1 Identification parameters of mixed-source oil ratio in Mosuowan area, Junggar Basin

判别参数	判别项目	混源比例(成熟 $P_{1f}$ : 高成熟 $P_{2w}$ )					
		10:0	0:10	8:2	6:4	4:6	2:8
$\beta$ -胡萝卜烷	盐度	1 910.70	181.57	1 424.41	1 082.41	617.37	522.54
伽马蜡烷	盐度/分层	194.35	17.08	114.67	99.47	54.88	41.44
$\gamma$ -胡萝卜烷	盐度	566.84	69.72	372.78	315.98	206.41	139.45
25-降藿烷	降解	71.61	0	43.11	34.94	20.61	17.08
Tm	成熟度	200.91	8.48	136.97	109.26	69.27	47.74
$C_{30}$ 藿烷	母质类型	647.36	51.80	499.38	364.15	234.64	177.34

注:成熟  $P_{1f}$  来源油采自基 003 井;高成熟  $P_{2w}$  来源油采自前哨 1 井。

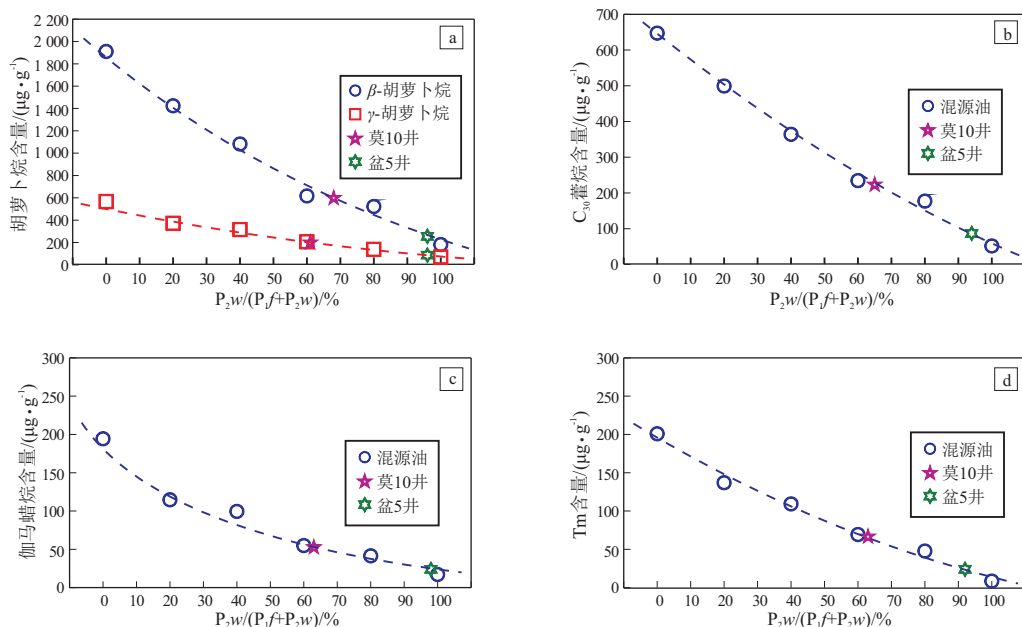


图 8 准噶尔盆地莫索湾地区成熟风城组来源与高成熟下乌尔禾组来源混源油生物标志物定量图

Fig.8 Quantitative diagram of biomarkers of mixed-source oil from mature Fengcheng Formation and high-maturity Lower Wuerhe Formation in Mosuowan area, Junggar Basin

混源比例的判别参数(表 1)。原油中胡萝卜烷系列、伽马蜡烷、25-降藿烷、Tm 和  $C_{30}$  藿烷具有较大油源辨识度,随着  $P_{2w}$  来源油所占比例增加,判别参数含量逐渐降低,反映水体盐度的  $\beta$ -胡萝卜烷含量由 1910.70  $\mu\text{g/g}$  降低至 181.57  $\mu\text{g/g}$ ;伽马蜡烷含量由 194.35  $\mu\text{g/g}$  降低至 17.08  $\mu\text{g/g}$ ;  $\gamma$ -胡萝卜烷含量由 566.84  $\mu\text{g/g}$  降低至 69.72  $\mu\text{g/g}$ ;反映生物降解程度的 25-降藿烷含量由 71.61  $\mu\text{g/g}$  降低至 0.00  $\mu\text{g/g}$ ;反映成熟度和有机相的 Tm 含量由 200.91  $\mu\text{g/g}$  降低至 8.48  $\mu\text{g/g}$ ;反映母质类型的  $C_{30}$  藿烷含量由 647.36  $\mu\text{g/g}$  降低至 51.80  $\mu\text{g/g}$ 。

根据计算结果,盆 5 井区和盆参 2 井区原油均以高成熟下乌尔禾组烃源岩贡献为主,贡献比例分别大于 80% 和 60%。以盆 5 井原油( $J_{1s}$ )为例,其  $\beta$ -胡萝卜烷含量为 255.12  $\mu\text{g/g}$ ,伽马蜡烷含量为

23.73  $\mu\text{g/g}$ ,  $\gamma$ -胡萝卜烷含量为 86.94  $\mu\text{g/g}$ , Tm 含量为 23.87  $\mu\text{g/g}$ ,  $C_{30}$  藿烷含量 86.91  $\mu\text{g/g}$ , 下乌尔禾组烃源岩贡献比例为 95%;以莫 10 井原油( $J_{1s}$ )为例,其  $\beta$ -胡萝卜烷含量为 597.13  $\mu\text{g/g}$ ,伽马蜡烷含量为 52.48  $\mu\text{g/g}$ ,  $\gamma$ -胡萝卜烷含量为 198.15  $\mu\text{g/g}$ , Tm 含量为 66.48  $\mu\text{g/g}$ ,  $C_{30}$  藿烷含量 222.91  $\mu\text{g/g}$ , 下乌尔禾组烃源岩贡献比例为 64% (图 8)。

综上所述,莫索湾地区盆 5 井区原油和盆参 2 井区原油整体来源相同,以晚期高成熟下乌尔禾组烃源岩贡献为主,混有早期成熟风城组烃源岩贡献。由于原油中风城组烃源岩贡献不同,而造成不同区块原油地球化学特征表现差异。由图 9 可见,该区油气成藏特征为:混源特征显著且复杂,并以后期生成的高成熟下乌尔禾组来源油为主。

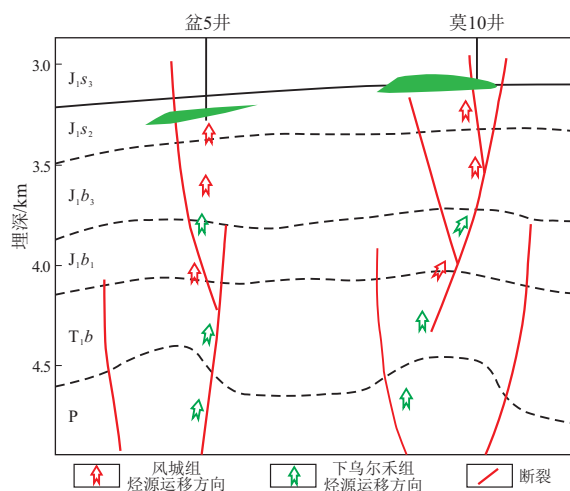


图9 准噶尔盆地莫索湾地区  
盆5井—莫10井油气成藏模式

Fig.9 Reservoir-forming model of wells Pen5 and Mo10  
in Mosuowan area, Junggar Basin

### 3 结论

准噶尔盆地莫索湾地区侏罗系储层普遍存在两期油气充注,早期为成熟的风城组烃源岩生成,晚期来源于下乌尔禾组烃源岩,以晚期充注为主;不同区块两期原油混合比例不同,盆5井区原油中下乌尔禾组烃源岩贡献较高,达到80%以上,而盆参2井区原油中下乌尔禾组烃源岩贡献在60%以上。盆5井区原油成熟度整体高于盆参2井区,主要表现为碳同位素更重、金刚烷异构化指标更大、 $T_s/T_m$ 值更高、水体沉积环境更偏氧化性以及 $Pr/Ph$ 值更大。

#### 参考文献:

[1] 麻伟娇,卫延召,李霞,等.准噶尔盆地腹部中浅层远源、次生油气藏成藏过程及主控因素[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(6):1195-1204.  
MA Weijiao, WEI Yanzhao, LI Xia, et al. Accumulation process and control factors of Jurassic-Cretaceous distant-source and secondary-filled reservoirs in the hinterland of Junggar Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(6):1195-1204.

[2] 况军,何登发,张年富,等.准噶尔盆地莫索湾凸起油气成藏模式[J].中国石油勘探,2005,10(1):40-45.  
KUANG Jun, HE Dengfa, ZHANG Nianfu, et al. Oil and gas migration and accumulation pattern of Mosuo Bay Uplift in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(1):40-45.

[3] 陶国亮,胡文瑛,曹剑,等.准噶尔盆地腹部二叠系混源油源组成与聚集特征研究[J].南京大学学报(自然科学),2008,44(1):42-49.  
TAO Guoliang, HU Wenxuan, CAO Jian, et al. Source composition and accumulation characteristics of Permian mixed oils in

central Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2008, 44(1):42-49.

- [4] 石新朴,王绪龙,曹剑,等.准噶尔盆地莫北—莫索湾地区原油成因分类及运聚特征[J].沉积学报,2010,28(2):380-387.  
SHI Xinpu, WANG Xulong, CAO Jian, et al. Genetic type of oils and their migration/accumulation in the Mobei-Mosuowan area, central Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2):380-387.
- [5] 姜林,吴孔友,曲江秀.准噶尔盆地莫索湾地区油源分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(2):25-27.  
JIANG Lin, WU Kongyou, QU Jiangxiu. Analysis of the oil source in Mosuowan area of Zhungeer Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(2):25-27.
- [6] 薄冬梅,姜林,曲江秀.准噶尔盆地莫索湾地区原油运移研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(4):18-23.  
BO Dongmei, JIANG Lin, QU Jiangxiu. Study on oil migration in Mosuowan area of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(4):18-23.
- [7] 唐勇,徐洋,翟建华,等.玛湖凹陷百口泉组扇三角洲群特征及分布[J].新疆石油地质,2014,35(6):628-635.  
TANG Yong, XU Yang, ZHANG Jianhua, et al. Fan-delta group characteristics and its distribution of the Triassic Baikouquan reservoirs in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6):628-635.
- [8] 彭兴芳,李周波.生物标志化合物在石油地质中的应用[J].资源环境与工程,2006,20(3):279-283.  
PENG Xingfang, LI Zhoubo. The application of biomarker in the research of petroleum geology[J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(3):279-283.
- [9] 王铁冠.生物标志物地球化学研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.  
WANG Tieguan. Study on biomarkers geochemistry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990.
- [10] 徐冠军,帅燕华,王培荣,等.姥鲛烷、植烷立体异构体的色谱分离及地球化学意义[J].地球化学,2010,39(5):491-496.  
XU Guanjun, SHUAI Yanhua, WANG Peirong, et al. Chromatographic separation of pristane and phytane stereoisomers and its geochemical significance[J]. Geochimica, 2010, 39(5):491-496.
- [11] 李二庭,陈俊,于双,等.生物降解稠油中沥青质热模拟实验[J].新疆石油地质,2017,38(5):580-585.  
LI Erting, CHEN Jun, YU Shuang, et al. Thermal simulation experiment on asphaltene in biodegraded heavy oil[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5):580-585.
- [12] MANGO F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum[J]. Science, 1987, 237(4814):514-517.
- [13] MANGO F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: a kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(5):1315-1323.
- [14] THOMPSON K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2):303-316.
- [15] 任英姿.车排子凸起新近系沙湾组原油轻烃地球化学特征及油源分析[J].油气地质与采收率,2014,21(3):10-14.



- REN Yingzi. Geochemical characteristic of light hydrocarbon in crude oil, Shawan Formation of Chepaizi Uplift [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(3): 10-14.
- [16] 吴夏, 李生涛, 万慧, 等. 原油轻烃地球化学特征研究 [J]. *当代化工*, 2018, 47(4): 840-843.
- WU Xia, LI Shengtao, WAN Hui, et al. Study on geochemical characteristics of light hydrocarbon in crude oil [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2018, 47(4): 840-843.
- [17] 王廷栋, 王海清, 李绍基, 等. 以凝析油轻烃和天然气碳同位素特征判断气源 [J]. *西南石油学院学报*, 1989, 11(3): 1-15.
- WANG Tingdong, WANG Haiqing, LI Shaoji, et al. Identification of sources of natural gases based on components of  $C_4$ - $C_7$  light hydrocarbons in oils (condensates) and carbon-isotopic characters of natural gases [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1989, 11(3): 1-15.
- [18] 孔婷, 张敏.  $C_4$ - $C_8$  轻烃在原油地球化学研究中的应用: 以塔里木盆地大宛齐油田凝析油为例 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 535-543.
- KONG Ting, ZHANG Min. Application of  $C_4$ - $C_8$  light hydrocarbons in geochemical studies: a case of condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(4): 535-543.
- [19] 杨帆, 冯一璟, 张琪琛. 生物标志化合物在湖泊环境的应用研究 [J]. *长江大学学报(自科版)*, 2015, 12(28): 56-60.
- YANG Fan, FENG Yijing, ZHANG Qichen. Application of biomarker compound in lake environment [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(28): 56-60.
- [20] 罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 等. 塔里木盆地顺北油气田不同层系原油地球化学特征对比及成因分析 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 849-854.
- LUO Mingxia, XIA Yongtao, SHAO Xiaoming, et al. Geochemical characteristics and origin of oil from different strata in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(6): 849-854.
- [21] 杨福林, 王铁冠, 李美俊. 塔里木台盆地寒武系烃源岩地球化学特征 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 861-872.
- YANG Fulin, WANG Tieguan, LI Meijun. Geochemical study of Cambrian source rocks in the cratonic area of Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 861-872.
- [22] 张迈, 刘成林, 田继先, 等. 柴达木盆地西部地区原油地球化学特征及油源对比 [J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(1): 61-72.
- ZHANG Mai, LIU Chenglin, TIAN Jixian, et al. Characteristics of crude oil geochemical characteristics and oil source comparison in the western part of Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(1): 61-72.
- [23] 陈建平, 魏军, 倪云燕, 等. 酒西坳陷原油地球化学特征与成熟度分类 [J]. *石油学报*, 2018, 39(5): 491-503.
- CHEN Jianping, WEI Jun, NI Yunyan, et al. Geochemical features and maturity classification of crude oil in the Jiuxi Depression, Jiuquan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(5): 491-503.
- [24] 曾凡刚, 程克明. 利用双金刚烷指标研究下古生界海相碳酸盐岩的热成熟度 [J]. *地质地球化学*, 1998, 26(3): 16-20.
- ZENG Fangang, CHENG Keming. Thermal maturity of Lower Palaeozoic marine carbonate rocks: a double adamantane index study [J]. *Geology Geochemistry*, 1998, 26(3): 16-20.
- [25] STOUT S A, DOUGLAS G S. Diamondoid hydrocarbons: application in the chemical fingerprinting of natural gas condensate and gasoline [J]. *Environmental Forensics*, 2004, 5(4): 225-235.
- [26] 任康绪, 黄光辉, 肖中尧, 等. 大宛齐原油金刚烷类化合物及其在油气运移中的应用 [J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(2): 27-31.
- REN Kangxu, HUANG Guanghui, XIAO Zhongyao, et al. Application of diamondoids to hydrocarbon migration in Dawanqi oilfield, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(2): 27-31.
- [27] 李二庭, 陈俊, 迪丽达尔·肉孜, 等. 准噶尔盆地腹部地区原油金刚烷化合物特征及应用 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 569-576.
- LI Erting, CHEN Jun, ROUZI Dildaer, et al. Characteristics of diamondoids in crude oil and its application in hinterland of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(4): 569-576.
- [28] LIANG Qianqiang, XIONG Yongqiang, FANG Chenchen, et al. Quantitative analysis of diamondoids in crude oils using Gas Chromatography - Triple Quadrupole Mass Spectrometry [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43: 83-91.
- [29] DES MARAIS D J, DONCHIN J H, NEHRING N L, et al. Molecular carbon isotopic evidence for the origin of geothermal hydrocarbons [J]. *Nature*, 1981, 292(5826): 826-828.
- [30] LAUGHREY C D, BALDASSARE F J. Geochemistry and origin of some natural gases in the Plateau Province, central Appalachian Basin Pennsylvania and Ohio [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(2): 317-335.
- [31] 黄攀, 任江玲, 李二庭, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷烃源岩和原油生物标志物与碳同位素组成及其意义 [J]. *地球化学*, 2016, 45(3): 303-314.
- HUANG Pan, REN Jiangling, LI Erting, et al. Biomarker and carbon isotopic compositions of source rock extracts and crude oils from Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Geochimica*, 2016, 45(3): 303-314.
- [32] 张文正, 裴戈, 关德师, 等. 中国几个盆地原油轻烃单体和正构烷烃系列分子碳同位素研究 [J]. *地质论评*, 1993, 39(1): 79-88.
- ZHANG Wenzheng, PEI Ge, GUAN Deshi, et al. The carbon isotopic composition of the light hydrocarbon monomer and normal alkane series molecules from crude oil of some petroliferous basins in China [J]. *Geological Review*, 1993, 39(1): 79-88.
- [33] 赵孟军, 黄第藩, 张水昌. 原油单体烃类的碳同位素组成研究 [J]. *石油勘探与开发*, 1994, 21(3): 52-59.
- ZHAO Mengjun, HUANG Difan, ZHANG Shuichang. An on-line carbon isotope study of hydrocarbon monomers in crude oils from Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 21(3): 52-59.
- [34] 李二庭, 靳军, 陈俊, 等. 生物降解稠油沥青质热解产物中生物标志化合物与单体烃碳同位素组成研究 [J]. *地球化学*, 2019, 48(3): 284-292.
- LI Erting, JIN Jun, CHEN Jun, et al. Study on biomarkers and carbon isotopic compositions of monomer hydrocarbons in asphaltene pyrolysis products from biodegraded heavy oil [J]. *Geochimica*, 2019, 48(3): 284-292.