

塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征

曹自成¹,路清华²,顾 忆²,吴 鲜³,尤东华²,朱秀香³

(1. 中国石化 西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126;
3. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:综合运用油气地球化学分析技术对顺北油气田1号和5号主干断裂带奥陶系油气藏进行研究,并结合油气物理性质和烃类相态特征等数据资料来开展不同断裂带上油气藏特征精细对比,从而探讨不同断裂带油气藏特征差异成因。结果表明,两条不同断裂带油气藏的油气源特征相似,均来自于还原性较强的腐泥型生烃母质,且均处于高成熟演化阶段,但顺北1号断裂带为未饱和挥发油藏,顺北5号断裂带为未饱和轻质油藏,1号断裂带油气成熟度明显高于5号断裂带。两条断裂带油气藏特征出现差异主要与顺北地区不同的油气充注过程和后期改造作用有关:顺北地区可能存在3期油气充注,5号断裂带油气藏为前两期油气的混合充注,最早一期油气遭到破坏,以第二期油气充注为主,而1号断裂带油气藏以最新的第三期油气充注为主;两条断裂带油气藏均未经明显的热裂解作用,但是1号断裂带原油经历轻微的硫酸盐热化学还原改造作用(TSR),而5号断裂带早期充注原油经历过生物降解作用(BSR)。不同的油气充注过程是导致顺北地区不同断裂带油气藏特征差异的主要因素。

关键词:地球化学特征;后生改造作用;1号断裂带;5号断裂带;油气藏特征;奥陶系;顺北油气田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin

Cao Zicheng¹, Lu Qinghua², Gu Yi², Wu Xian³, You Donghua², Zhu Xiuxiang³

(1. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Exploration & Production Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Ordovician reservoir characteristics in two major fault zones (Shunbei 1 and 5) in the Shunbei area of the Tarim Basin were studied by integrated petroleum geochemical analysis techniques. The reservoir characteristics in the two fault zones are finely described and compared based on petroleum physical properties and hydrocarbon facies attributes, with a view to obtaining the origin of differential characteristics for reservoirs in different fault zones. The results show that the two fault zones share similar oil-gas sources of sapropelic hydrocarbon-generating parent materials with strong reducibility and of high thermal maturity. However, the Shunbei 1 fault zone has unsaturated volatile oil reservoirs, whereas the Shunbei 5 fault zone has unsaturated light oil reservoirs; and the maturity of oil and gas from the Shunbei 1 fault zone is significantly higher than that from the Shunbei 5 fault zone. These differences could be attributed to the multi-stage oil and gas charge and later reformation in the Shunbei area, which may have undergone three stages of hydrocarbon charge. The reservoirs in the Shunbei 5 fault zone were formed by both the first and second stages of hydrocarbon charge (mainly by the second stage as the hydrocarbon from the first stage of charge was mostly dissipated due to some damage) and those in the Shunbei 1 fault zone were largely the result of the third stage of hydrocarbon charge. Neither fault zones have undergone obvious thermal cracking, except for a slight thermochemical sulfate reduction (TSR) to the crude in the Shunbei 1 fault zone, and BSR to the early charged crude in the Shunbei 5 fault zone. Different charging processes are the main factors leading to different reservoir characteristics of different fault zones in the Shunbei area.

Key words: geochemical characteristics, epigenetic transformation, Shunbei 1 fault zone, Shunbei 5 fault zone, reservoir characteristics, Ordovician, Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

收稿日期:2018-12-21;修订日期:2020-07-30。

第一作者简介:曹自成(1979—),男,高级工程师,油气勘探综合研究与评价。E-mail: caozc. xbsj@ sinopec. com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-002)。

顺北地区顺北油气田位于新疆阿克苏地区沙雅县境内,地处号称“死亡之海”的塔克拉玛干沙漠地区,北接哈拉哈塘凹陷的中国石油跃满区块,西接阿瓦提断陷北斜坡,处于顺托果勒低隆与沙雅隆起西南斜坡倾没端的交汇部位(图1)。

顺北地区在埋深7 000 m以下特深碳酸盐岩领域获得重大油气突破^[1],油气成果丰富,油气藏具有沿断裂带整体含油、不均匀富集的特点^[1-2]。顺北1号断裂带获得油气突破后,顺北5号断裂带也取得了新的油气突破。两条断裂带油气成果丰富,但油质差异大,顺北1号断裂带(包括主干断裂带和分支断裂带)原油均为颜色浅、透明度高、密度小的挥发油,顺北5号断裂带原油为颜色深、透明度差、密度稍大的轻质油,两条断裂带原油除了外观差异,还存在哪些差异?导致这些差异的主控因素是什么?前人从断裂对不同断裂带油气富集的控制作用^[2-3]或者不同层系油气藏地球化学特征进行了论述^[4-5],也有学者对1号断裂带油气藏地球化学特征展开精细解析^[6],尚未有不同断裂带油气藏地球化学特征对比分析的研究成果。

针对目前存在的问题,本文通过对油气物理性质、油气藏类型和油气地球化学特征的研究,分析顺北1号和5号断裂带油气藏特征并开展不同断裂带油气藏特征的精细对比,进一步探讨不同断裂带油气藏特征

差异形成的原因,以期为深入研究顺北油气田不同断裂带成藏特征提供依据。

1 样品及实验分析

油气样品采自顺北地区奥陶系两条断裂带的相关井区(图1),其中包括1号断裂带11口钻井(主干断裂带8口和分支断裂带3口)和5号断裂带4口钻井。

本文相关的主要测试方法包括全油轻烃指纹、饱和烃色谱、饱和烃与芳烃色谱-质谱和碳同位素质谱等,分析仪器为 Aglient 6890 气相色谱仪、Aglient 5973N 质谱仪及 DELTA V 同位素比率质谱仪等,以上测试均在中国石化油气成藏重点实验室(无锡)完成。

2 不同断裂带油气藏特征对比

2.1 油气性质

油气性质反映其化学组成特征,与油气演化历史和保存环境条件等密切相关。顺北1号断裂带和顺北5号断裂带原油基本物理性质存在差异。从原油外观上来看,1号断裂带原油颜色浅,为浅黄色,透明度高,5号断裂带原油颜色深,多为暗褐色-黑色,透

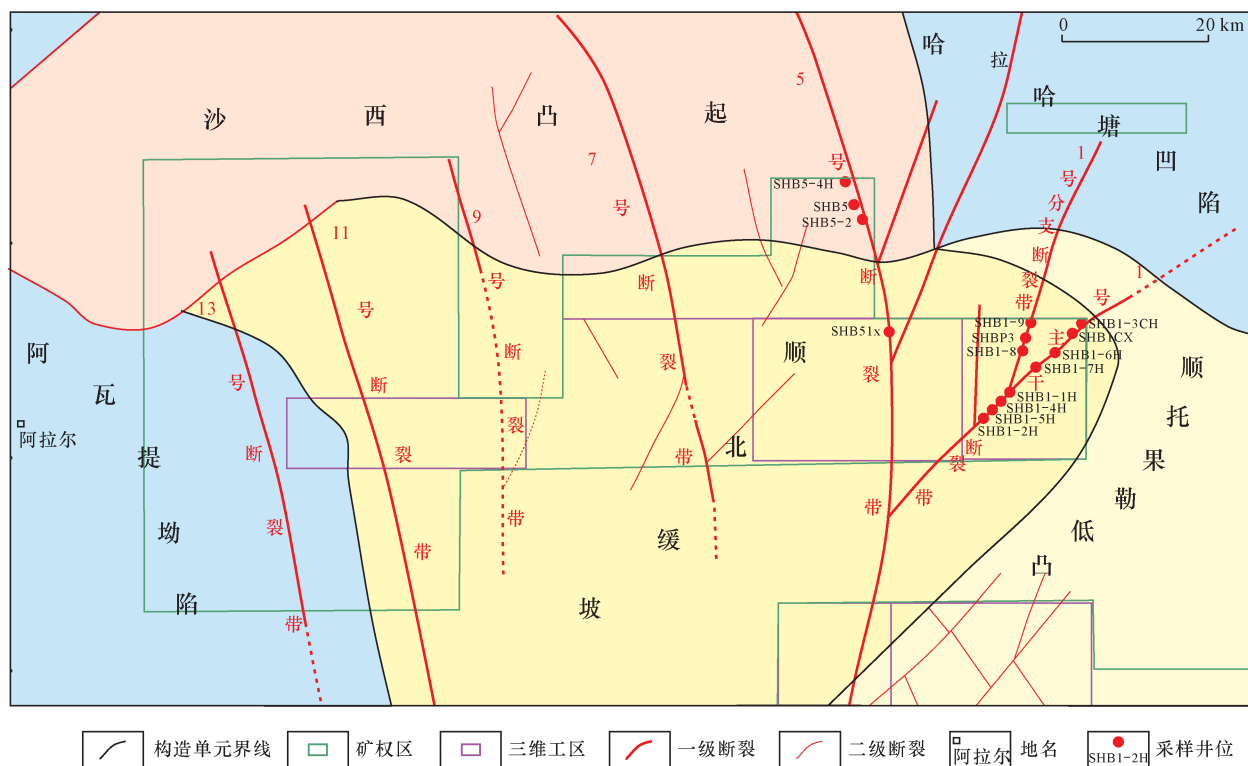


图1 塔里木盆地顺北油气田构造位置

Fig. 1 Structural location of the Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

明度低。两条不同断裂带已发现油气的钻井原油物理性质统计显示,1号断裂带原油为低含硫量(0.09%~0.14%)、低密度(0.786 1~0.819 8 g/cm³)的挥发油;5号断裂带原油总体为低含硫量(0.163%~0.214%)、较低密度(0.820 5~0.843 4 g/cm³)轻质油。

顺北地区不同断裂带已发现的钻井天然气密度特征显示,顺北1号断裂带天然气密度低,分布在0.65~0.75 g/cm³;顺北5号断裂带天然气密度明显高于1号断裂带,分布在0.84~0.94 g/cm³。天然气常规组分统计显示,1号断裂带和5号断裂带各钻井天然气特征基本相似,其中烃类组分占绝对优势,且1号断裂带具有更高含量的烃类组分,分布在92.66%~95.75%,5号断裂带烃类组分含量分布在77.85%~83.87%;5号断裂带烃类组分含量非烃组分含量较1号断裂带稍低。

顺北1号断裂带和5号断裂带天然气烃类组分组成特征显示,不同断裂带的甲烷含量中等(其中1号断裂带分布范围为75.60%~85.24%,5号断裂带分布范围为46.64%~56.58%),C₂₊烃类含量较高(其中1号断裂带分布范围为9.75%~18.6%,5号断裂带分布范围为27.29%~35.8%),表现为原油伴生气的特点;同时,5号断裂带天然气具有更高含量的C₂₊烃类和更低含量的甲烷组分,干燥系数低,分布在0.58~0.69,1号断裂带天然气干燥系数略高于5号断裂带,分布在0.82~0.90。

天然气非烃组成组分特征显示不同断裂带CO₂含量特征相似,均较低,其中顺北1号断裂带分布范围为0.88%~4.83%,5号断裂带分布范围为1.39%~5.58%;氮气(N₂)和硫化氢(H₂S)含量特征存在差异,其中N₂含量表明1号断裂带明显低于5号断裂带(1号断裂带分布范围为1.89%~7.15%,5号断裂带分布范围为13.84%~19.26%),H₂S含量表明1号断裂带明显高于5号断裂带(1号断裂带分布范围为2 324~10 086 mg/m³,均值为7 345.5 mg/m³,样品数为8件;5号断裂带值分布范围为5~841 mg/m³,均值为228 mg/m³,样本数为4件)。

2.2 油气藏类型

油气藏烃类流体的物理性质取决于其化学组分,同时与油气藏及地面条件下的温度和压力系统有关;油气藏地层流体pVT分析技术研究油藏流体的相态和性质,可以有效判断油气藏类型^[7-8]。

油气藏地层流体pVT分析技术显示,顺北1号断裂带典型钻井SHB1-1H井和5号断裂带典型钻井

SHB5井均为未饱和油气藏,储层地层温度位于临界温度的左侧,且远离临界点,地饱压差大。

不同断裂带典型钻井烃类流体组分特征(图2)表明,SHB1-1H井油气藏流体具有C₇₊重烃含量中等、C₁+N₂含量较高的特点,气油比为459 m³/m³,地表原油密度低,为0.79 g/cm³,油质相对较轻,属于挥发油范畴;SHB5井油气藏流体的井流物组分中,C₇₊重烃含量较高,C₁+N₂含量略低,气油比仅为50 m³/m³,地表原油密度为0.83 g/cm³,属于轻质油。

2.3 地球化学特征

通过饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱、芳烃色谱-质谱及碳同位素值分析,研究油气地球化学特征,确定生烃母质类型、沉积环境和成熟度等。

2.3.1 饱和烃色谱

顺北地区不同断裂带原油色谱图(图3)呈前单峰主峰型,无明显奇偶优势,正构烷烃碳数分布完整,1号断裂带主峰碳数分布在C₁₂—C₁₉,5号断裂带主峰碳数分布在C₁₅—C₁₇范围内;原油中低碳数正构烷烃含量丰富,以nC₂₁-烷烃为主,nC₂₅+正构烷烃含量较低,呈现nC₂₁-/nC₂₂+比值高(1号断裂带分布在1.88~13.94,5号断裂带分布在3.38~6.65)和C₂₁₊₂₂/C₂₈₊₂₉比值高(1号断裂带分布在3.98~13.03,5号断裂带分布在5.46~14.57)的特征,表明低等水生生物为主的腐泥型生烃母质类型。

OEP和CPI两比值参数值均分布在1.0左右,其中OEP参数在1号断裂带分布范围为0.98~1.05,在

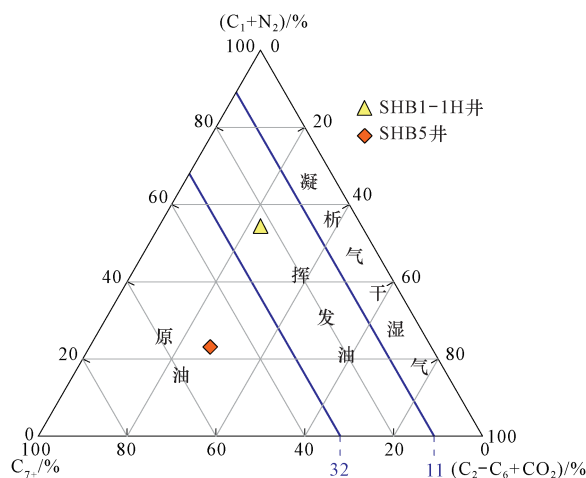


图2 顺北地区不同断裂带奥陶系典型钻井流体特征三元图
Fig. 2 Ternary diagram showing the characteristics of typical Ordovician fluid in different fault zones of the Shunbei area

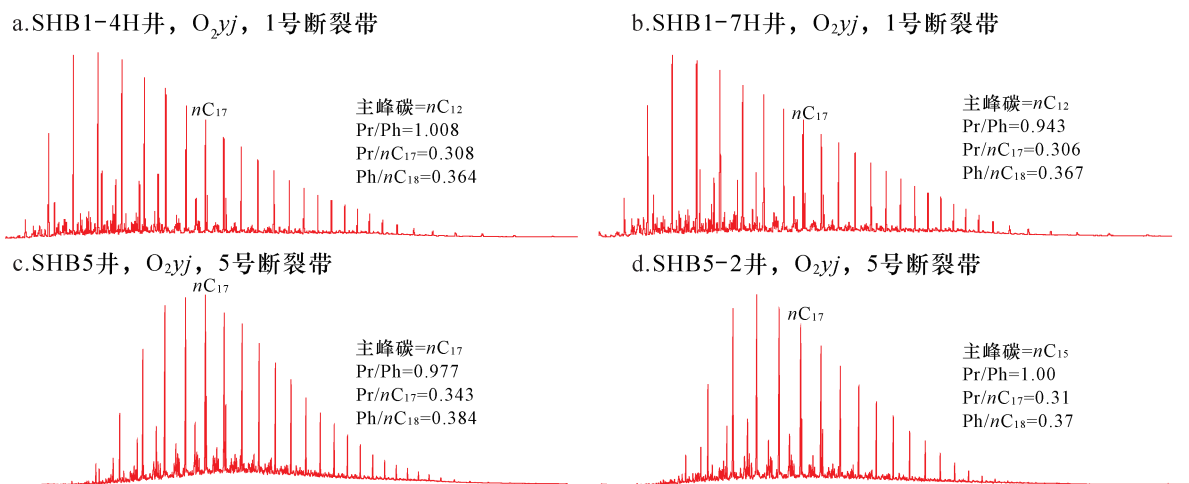


图3 顺北地区不同断裂带奥陶系原油饱和烃气相色谱

Fig. 3 Gas chromatogram of saturated hydrocarbons from the Ordovician crude oil in different fault zones in Shunbei area

5号断裂带分布范围为1.01~1.04; CPI参数在1号断裂带分布范围为1.0~1.12,在5号断裂带分布范围为1.01~1.12,均表明顺北地区原油已达成熟热演化阶段且成熟度较高。

Pr/nC₁₇和Ph/nC₁₈是常用的表征原油地球化学特征的有效参数,受成熟度、沉积环境等多种因素的影响。由图4可知,顺北1号断裂带和5号断裂带原油与塔河主体区的原油近似分布在一条直线上,表明了这些样品具有相同的生源特征,均来自于还原环境的海相藻类生烃母质。

2.3.2 饱和烃色-质

规则甾烷相对组成特征与原始有机质的生源构成有关。顺北地区奥陶系不同断裂带原油的 $\alpha\alpha\alpha$ -C₂₇, $\alpha\alpha\alpha$ -C₂₈和 $\alpha\alpha\alpha$ -C₂₉规则甾烷分布特征相似,整体表现为较高含量的C₂₉规则甾烷分布,仅个别钻井原油的C₂₉规则甾烷百分含量低于40%,其余钻井原油的C₂₉规则甾烷最高含量为54%。国内外学者^[9-12]在塔里木盆地寒武系等许多古生界和更老时代的原油以及一些碳酸盐岩来源的原油发现规则甾烷组成中C₂₉甾烷含量丰富,但它们的源岩没有或很少有高等植物的输入,这一现象表明,原油中丰富的C₂₉甾烷归因于浮游植物藻类。因此认为顺北地区原油原油与塔里木盆地其它地区如塔河、玉北、巴楚-麦盖提等地区原油相似,生烃母质来源为海相浮游植物、藻类为主。

三环萜烷(TT)广泛分布在原油和源岩抽提物中,其分布特征受成熟演化程度的影响,且三环萜烷表征的成熟度范围较广,应用于顺北地区能有效区分不同断裂带原油成熟度热演化序列。图5所示,随着热演化程度的增加,C₁₉/C₂₁TT和C₂₀/C₂₃TT两参数比值增

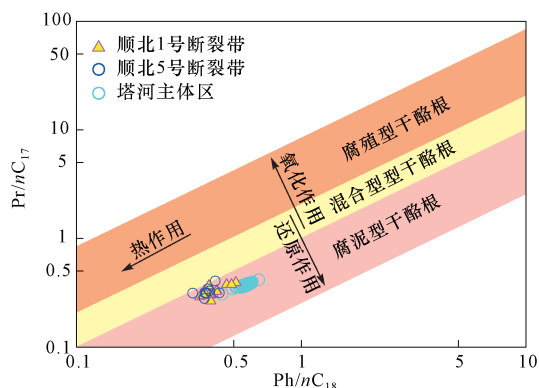


图4 顺北地区奥陶系不同断裂带原油饱和烃色谱参数相关图

Fig. 4 Chromatographic parameters of saturated hydrocarbons from the Ordovician crude oil in the Shunbei 1 and 5 fault zones

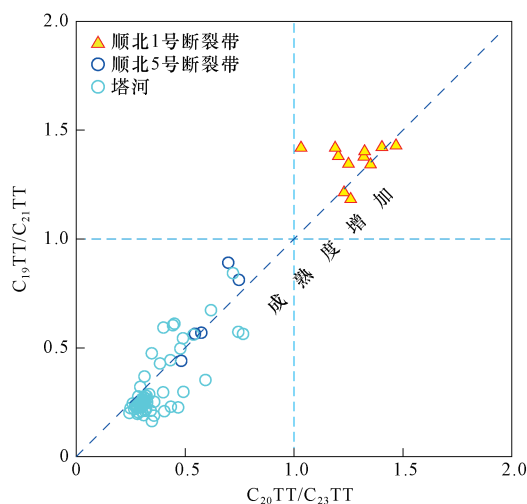


图5 顺北地区奥陶系不同断裂带原油饱和烃三环萜烷系列(TT)成熟度参数特征

Fig. 5 Maturity of tricyclic terpanes (TT) in saturated hydrocarbons from the Ordovician crude oil in the Shunbei 1 and 5 fault zones

大,呈正相关关系,且整体特征显示,顺北地区不同断裂带原油成熟度高于塔河地区。同时顺北地区1号断裂带和5号断裂带成熟度特征存在差异,1号断裂带两参数比值均大于5号断裂带,表明其原油成熟度高于5号断裂带。

2.3.3 芳烃色-质

原油芳烃化合物中三芴系列化合物常用于识别有机质沉积环境,芴(F)序列化合物在氧化环境中转化为氧芴(OF),在还原环境中转化为硫芴(SF),因此陆相淡水烃源岩和原油中芴含量高,沼泽相煤和煤成油等偏氧化环境来源的原油中氧芴含量高,盐湖相等偏还原环境来源的原油中硫芴含量高^[13-15]。有研究者^[16]认为,利用 $SF/(SF+F)$ 比值和 $OF/(OF+F)$ 比值关系图还可进一步区分原油的过渡环境。顺北地区不同断裂带原油芳烃组成中, $SF/(SF+F)$ 比值较高,介于 0.50~0.93,而 $OF/(OF+F)$ 比值较低,小于 0.10,显示原油母质主要是处于还原性较强的沉积环境。

甲基菲系列化合物因其总体具有较好的抗热降解能力,能有效判别原油热成熟演化程度,尤其是在较高成熟演化特征判识应用中具有优势。甲基菲指数(MPI_1 和 MPI_2)是常用的成熟度指标^[17],其中 $MPI_1 = 1.5 \times [(2 - MP) + (3 - MP)] / [P + (1 - MP) + (9 - MP)]$; $MPI_2 = 3 \times (2 - MP) / [P + (1 - MP) + (9 - MP)]$ 。研究表明,顺北地区不同断裂带原油成熟度存在差异(图6),1号断裂带原油成熟度高于5号断裂带,同时5号断裂带南段的 SHB51X 井原油成熟度要高于断裂北段。

2.3.4 碳同位素

原油及其族组分的碳同位素组成特征反映了生烃母质的碳同位素组成特征,顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系原油及族组分碳同位素值分布范围变化较小,全油碳同位素值 $\delta^{13}C$ 介于 $-32.6\text{‰} \sim -31.7\text{‰}$,表明了海相原油特征^[18]。

通过对顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征研究可知,两条断裂带油气既即存在相似性,又存在一定程度的差异性。

1) 相似性。①生烃母质类型相似,规则甾烷组成特征显示不同断裂带原油生烃母质类型良好,以海相浮游植物、藻类等水生生物为主;②有机质沉积环境相似,三芴系列化合物组成特征中均呈硫芴化合物绝对优势特征,表征生烃母质沉积环境还原性较强;③均处于高成熟热演化阶段,饱和烃色谱无明显奇偶优势,均

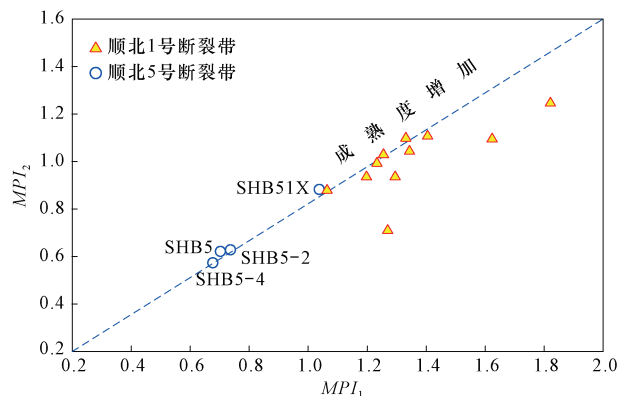


图6 顺北地区1号/5号断裂带奥陶系原油芳烃中甲基菲成熟度参数特征

Fig. 6 Maturity of methylphenanthrene in aromatics from Ordovician crude oil in the Shunbei 1 and 5 fault zones

以达到成熟且热演化程度较高。

2) 差异性。①油气基本性质存在差异,1号断裂带原油颜色浅、透明度好,为密度更轻的挥发油;天然气为密度更低,具有更高含量的烃类组分和更低含量的非烃组分,干燥系数略高的原油伴生气;5号断裂带原油颜色深、透明度低,为密度略重的轻质油;天然气为密度较大,烃类组分含量略低非烃组分含量更高,干燥系数低的原油伴生气;②油气藏类型不同,1号断裂带主要为未饱和型挥发质油藏,5号断裂带主要为未饱和型轻质油藏;③成熟度演化特征存在差异,虽然两条断裂带原油均呈现高成熟热演化特征,但不同断裂带原油热演化程度序列存在差异,饱和烃中三环萜烷成熟度参数和芳烃中菲系列成熟度参数表明1号断裂带原油成熟度显著高于5号断裂带。

3 油气藏地化特征差异成因

顺北地区不同断裂带油气藏地化特征差异与不同的油气充注过程和后生改造作用有关。通过生物标志物法和碳同位素特征综合识别不同断裂带的油气充注过程,并从生物降解作用、热裂解作用和硫酸盐热化学还原作用(TSR)3个方面分析油气藏的后生改造。

3.1 油气充注过程

3.1.1 生物标志化合物

特殊的生物标志物分布样式可以定性地揭示油气成藏过程,前人研究结果表明,“UCM”(未知复杂混合物)基线鼓包、完整的正构烷烃系列和25-降藿烷系列同时出现,与原油的二次充注有关^[19]。

顺北1号断裂带挥发性原油中未检测到“UCM”基线鼓包、并有完整的正构烷烃系列(图3),同时生物标志化合物碎片离子($m/z = 191$)萜烷系列化合物分布特征图显示,藿烷系列化合物缺失,未检测到25-降藿烷系列化合物(图7),表明该断裂带成藏后未遭受后生改造作用,油气保存条件较好。

顺北5号断裂带轻质原油中检测出微弱的“UCM”基线鼓包,并有完整的正构烷烃系列(图3),且生物标志化合物碎片离子($m/z = 191$)特征显示,藿烷系列化合物含量低且分布不完整,含有少量25-降藿烷系列化合物(图7)。前人研究成果认为,“UCM”基线鼓包多与后生改造作用(包括生物降解、热裂解和TSR作用等)有关,而“UCM”基线鼓包与完整正构烷烃系列的并存是早期油气充注遭受后生改造后,存在油气再次充注的结果。因此推测顺北5号断裂带油气藏存在两期油气充注过程,其中早期油气充注遭受后生改造作用。

3.1.2 碳同位素分布特征

原油碳同位素分布序列可以充分反映原油充注的多期性,早期充注原油成熟度低,其碳同位素值也较低,晚期充注原油成熟度高碳同位素较重,不同期次充注原油混合后呈现原油及族组分碳同位素分布特征异常,由此判别原油的充注期次^[20]。

对于正常原油而言,原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在饱和烃、全油、芳烃、非烃与沥青质之间具有逐渐变重的正常序列,混合原油中由于早、晚期原油族组分的差异,反映在各族组分间的碳同位素值出现变化,原油及族组分碳同位素分布序列倒转。一般来说,混合油族组分

成中,重质组分(非烃+沥青质)碳同位素值更多反映的是早期充注原油的特征,碳同位素较轻;轻质组分(饱和烃)碳同位素值则更多反映的晚期充注原油的特征,碳同位素偏重。由此混合油的碳同位素序列倒转多表现为饱和烃碳同位素的异常变重或者非烃、沥青质组分碳同位素的异常变轻。顺北1号和5号断裂带奥陶系原油及族组分碳同位素分布序列均呈现部分倒转的特征(图8),具体表现为沥青质碳同位素偏轻,证实了原油多期充注的成藏过程。同时1号断裂带部分钻井原油具有饱和烃碳同位素变重的倒转特征,表明其后期充注的原油期次更晚,成熟度更高。

3.1.3 流体包裹体特征

顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系储层中烃类包裹体大量发育,主要宿主于裂缝充填亮晶方解石脉或溶洞(孔)充填的亮晶方解石中,荧光颜色主要为黄绿色-蓝绿色,同时也检测到大量的不发荧光的气包裹体。烃类包裹体相态上单一相与多相态并存;成分上既有油、气、盐水单一相,同样存在油、气、水相互混合的两相或者多相。包裹体形态主要有椭圆形、方形、条形、不规则状,其中以椭圆形和条形为主。

原油荧光光谱参数可定量表征荧光颜色,是评价原油成熟度和油气充注的有效方法,其中 $\lambda_{\max}$ 为原油微束荧光光谱主峰对应的波长,QF-535为波长720和535 nm所限定的面积与波长535和430 nm所限定面积之比,两参数均与原油内重烃组分含量呈正相关关系。1号断裂带3口单井13项次的原油荧光光谱测试结果显示, $\lambda_{\max}$ 值分布介于457.9~479.4 nm,均值为464.5 nm;QF-535比值分布介于0.379~0.740,

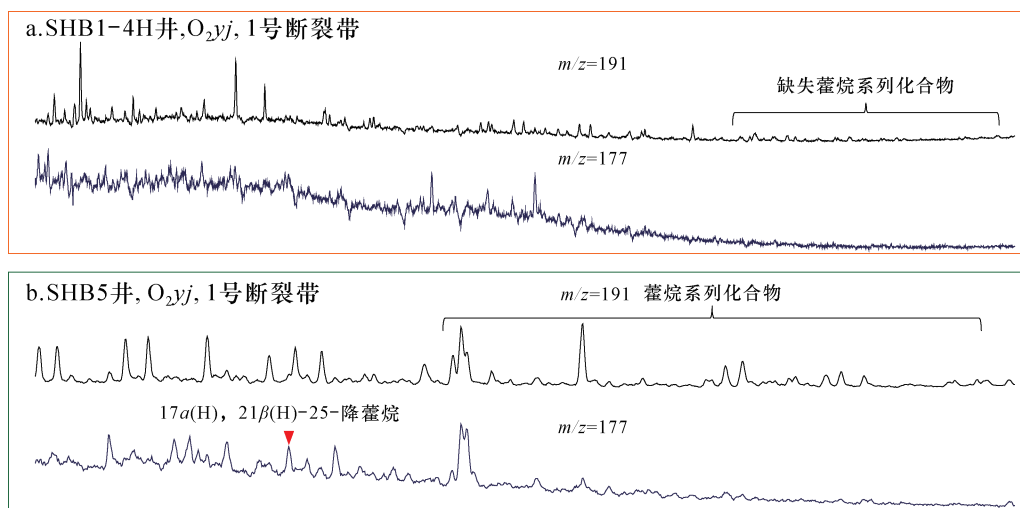


图7 顺北地区不同断裂带奥陶系典型钻井原油饱和烃色谱-质谱

Fig. 7 GC-MS of saturated hydrocarbons from crude oil in typical wells in different fault zones of the Shunbei area

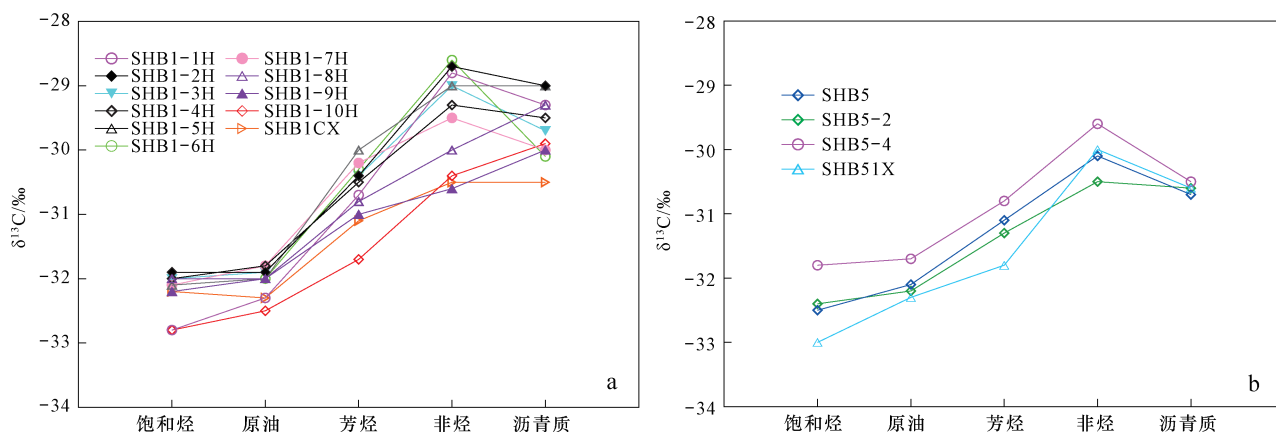


图8 顺北地区1号(a)和5号(b)断裂带奥陶系原油族组分碳同位素分布特征

Fig. 8 Distribution of carbon isotope of family components from Ordovician crude oil in the Shunbei 1 (a) and 5 (b) fault zones

均值为0.549。5号断裂带2口单井6项次的原油荧光光谱测试结果显示, $\lambda_{\max}$ 值分布介于495.4~516.8 nm, 均值为508.5 nm; QF-535 比值分布介于0.876~1.268, 均值为1.1。由此可见, 1号断裂带奥陶系原油内重烃组分含量明显低于5号断裂带, 表征了其油气充注过程的差异, 即1号断裂带油气成熟度较5号断裂带偏高, 充注时间应晚于5号断裂带。

流体包裹体均一温度广泛应用于定量表征油气成藏时间。5号断裂带 SHB5 井奥陶系流体包裹体多分布在裂缝充填的方解石中, 与液态烃包裹体伴生的两相盐水溶液包裹体均一温度主频率峰值介于85~105 °C ($n=69$); 1号断裂带 SHB1-3 井奥陶系流体包裹体多分布在裂缝/溶孔充填的方解石中, 与液态烃包裹体伴生的两相盐水溶液包裹体均一温度分布主频率峰值介于115~140 °C ($n=77$)。因此, 顺北油气田奥陶系油气藏经历了至少两期油气充注, 5号断裂带对应了相对早期的一次液态烃充注过程, 1号断裂带对应的是一期时间较晚的液态烃充注过程。

生物标志化合物及流体包裹体特征分析的研究结果表明, 顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏具有多期油气充注的特点, 至少存在3期油气充注, 5号断裂带原油成熟度明显低于1号断裂带, 为前两期油气的混合充注, 早期遭到破坏, 以第二期成熟度较高的油气充注为主, 1号断裂带为第三期成熟度最高的油气充注为主, 油气保存条件好。这种油气多期充注的成藏过程差异是油气藏差异性的主控因素

3.2 后生改造作用

3.2.1 热蚀变改造作用

顺北地区油气藏具有储层埋藏深(垂深>7 500 m)、温度高(>160 °C)的特点^[1], 尤其1号断裂带原油热

成熟高, 具备原油发生热蚀变改造作用的基础地质条件。原油的热蚀变改造作用导致芳香烃化合物和多环化合物含量的增加, 因此可以用表征芳构化作用和环化作用的地化参数识别原油的热蚀变改造作用。顺北地区不同断裂带原油($n=27$)表征芳构化程度的指标参数二甲苯/正辛烷比值略高(介于0.14~0.74, 均值为0.49), 表征环化程度的指标参数甲基环己烷/二甲基环戊烷比值低(介于1.76~2.97, 均值为2.27), 表明总体未经历明显的热蚀变改造作用。

金刚烷系列化合物也是常用的表征原油热蚀变改造作用的有效参数, 认为其在原油中的含量与烃源岩演化过程无关, 而与液态烃的热裂解程度呈正相关关系, 前人^[21-23]建立通过金刚烷和 $\alpha\alpha\alpha-20R-C_{29}$ 规则甾烷绝对含量判识原油热裂解程度的方法。顺北地区1号断裂带原油中金刚烷绝对含量分布在780.92~1077.89 $\mu\text{g/g}$, 单金刚烷绝对含量分布在703.11~981.73 $\mu\text{g/g}$, 双金刚烷绝对含量分布在73.23~96.17 $\mu\text{g/g}$, 4-甲基+3-甲基双金刚烷绝对含量分布在21.76~28.49 $\mu\text{g/g}$, $\alpha\alpha\alpha-20R-C_{29}$ 规则甾烷绝对含量分布在5.08~8.91 $\mu\text{g/g}$, 根据 Dahl^[21]等提出的原油裂解定量评价模板, 亦表明1号断裂带奥陶系原油未经历明显的热裂解作用。

3.2.2 TSR 改造作用

硫酸盐热化学还原作用(TSR)能显著天然气的性质, 油气藏经过 TSR 作用改造后通常高含 H_2S ^[24]。顺北地区不同断裂带 H_2S 含量差别显著, 其中1号断裂带共8口钻井 H_2S 含量丰富, 大多含量均高于6 500 mg/m^3 , 最高含量可达10 086 mg/m^3 , 均值为7 345.5 mg/m^3 , 仅个别钻井含量稍低于3 000 mg/m^3 , 推测高含量的 H_2S 特征可能与 TSR 改造作用有关;

5号断裂带4口钻井H₂S含量低,仅SHB5-2井含量较高为841 mg/m³,其余各井含量均低于100 mg/m³,表明未经历TSR改造作用。

前人研究结果^[25-27]表明,TSR作用将导致烃类碳同位素偏重。顺北1号断裂带甲烷碳同位素值分布在-47.2‰~-44.7‰,平均值为-46.4‰;乙烷碳同位素值仅SHB1-1H井较低,为-36.1‰,其余各井均大于-35‰,分布在-34.4‰~-33.3‰。顺北5号断裂带甲烷碳同位素值分布为-49.6‰~-48.9‰,均值为-49.2‰;乙烷碳同位素值均小于-35‰,分布在-39.3‰~-35‰。顺北1号断裂带天然气烃类碳同位素明显较5号断裂带偏重,推测除与较高的成熟度有关,同时也是微弱TSR改造作用的结果;而5号断裂带可能表明未经历TSR改造作用。

依据芳烃中含硫类生物标志化合物比值参数DBT/P(二苯并噻吩/菲)识别顺北地区不同断裂带原油是否经历TSR改造作用^[28-29],1号断裂带7口钻井原油统计结果显示,总体具有较高的含硫类芳烃化合物参数比值,DBT/P比值介于0.93~1.27,均值为1.1,显示具有高于塔河地区奥陶系原油DBT/P比值0.2~1.0分布范围的特征,略低于塔中地区奥陶系鹰山组发生TSR改造作用原油DBT/P分布范围(1.59~6.62),推测1号断裂带奥陶系原油可能存在微弱的TSR改造作用;5号断裂带4口钻井原油统计结果显示,DBT/P比值较低,介于0.22~0.43,应未经历TSR改造作用。金刚烷系列化合物亦表明顺北地区TSR作用弱^[30]。

3.2.3 生物降解作用

饱和烃色谱基线的“UCM”基线鼓包,通常认为这是因生物降解引起环烷烃及异构烷烃富集,而在色谱中难以分离的结果,多与后生改造作用(包括生物降解、热裂解和TSR作用等)有关,“UCM”基线鼓包与完整正构烷烃系列的并存是早期油气充注遭受后生改造后,存在油气再次充注的结果^[31]。前面已经提到,顺北1号断裂带饱和烃色谱基线平直、正构烷烃系列分布完整,藿烷系列缺失未检测到25-降藿烷系列,表明该断裂带保存条件良好,未经历明显的生物降解作用;顺北5号断裂带轻质原油中“UCM”基线鼓包、完整的正构烷烃系列和少量25-降藿烷系列化合物并存,同时前面论述已知,5号断裂带原油未经历明显的热裂解改造作用和TSR作用,因此推测5号断裂带原油中“UCM”基线鼓包与生物降解作用有关,表明该断裂带早期充注原油可能经历了微生物降解作用。

4 结论

1) 顺北地区不同断裂带油气藏地球化学特征相似性表明其油气同源:原油规则甾烷化合物组成中C₂₉-规则甾烷含量丰富,为来源于水生生物等类型好的生烃母质;三萜系列化合物组成特征中呈硫萜优势,表明其有机质沉积环境还原性较强;饱和烃色谱图呈前单峰主峰分布特征,无奇偶优势,显示其处于高成熟演化阶段;天然气重烃含量较高,干燥系数低,为与原油伴生的油型气;

2) 顺北地区1号断裂带油质轻,为未饱和挥发油藏,顺北5号断裂带油质较1号断裂带略重,为未饱和轻质油藏;原油饱和烃三环萜烷成熟度参数和菲系列化合物成熟度参数表明1号断裂带原油成熟度明显高于5号断裂带,同时5号断裂带原油南段成熟度高于北段;天然气干燥系数特征表明,1号断裂带天然气成熟度明显高于5号断裂带;

3) 顺北地区1号断裂带和5号断裂带油气藏特征差异性与多期油气充注和后期改造作用有关,且由多期充注导致的成藏过程差异是不同断裂带油气藏特征差异的主控因素:①顺北地区可能存在3期油气藏充注,1号断裂带油气成熟高,以最晚的第三期油气充注为主,5号断裂带油气成熟度略低,主要为前两期油气充注混合成藏,且最早一期油气充注遭到破坏以第二期油气充注为主;②1号断裂带油气保存条件优于5号断裂带,且两条断裂带均未经过明显的热蚀改造作用,但1号断裂带成藏后经历轻微的TSR改造作用,5号断裂带在成藏过程中早期曾经历过轻微的生物降解作用。

参考文献

- [1] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [2] 邓尚, 李慧莉, 张中培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888.
- [3] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
Jiao Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-

- slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831–839.
- [4] 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 & Experiment, 2019, 41(6): 849–854.
- [5] 吴鲜, 曹自成, 路清华, 等. 塔里木盆地顺北地区白垩系原油成因类型与来源[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 255–262.
- Wu Xian, Cao Zicheng, Lu Qinghua, et al. Genetic types and sources of Cretaceous crude oil in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 255–262.
- [6] 高晓歌, 吴鲜, 洪才均, 等. 顺北油田1号断裂带奥陶系原油地球化学特征[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 37–40.
- Gao Xiaoge, Wu Xian, Hong Caijun, et al. Geochemical characteristics of Ordovician crude oil in the No. 1 fault zone of Shunbei oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(6): 37–40.
- [7] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2003: 16–17.
- Qin Jishun, Li Aifen. Reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum University Press, 2003: 16–17.
- [8] Danesh A. PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids [J]. Developments in Petroleum Science, 1998, 11(1): 1–3.
- [9] 孟凡巍, 周传明, 燕夔, 等. 通过 C_{27}/C_{29} 甾烷和有机碳同位素来判断早古生代及前寒武纪的烃源岩的生物来源[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(1): 51–56.
- Meng Fanwei, Zhou Chuanming, Yan Kui, et al. Biological origin of early Palaeozoic and Precambrian hydrocarbon source rocks based on C_{27}/C_{29} sterane ratio and organic carbon isotope [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2006, 23(1): 51–56.
- [10] 边立曾, 张水昌, 梁狄刚, 等. 塔里木盆地晚奥陶世古海藻果实状化石及塔中油田生物母质特征[J]. 微体古生物学报, 2003, 20(1): 89–96.
- Bian Lizeng, Zhang Shuichang, Liang Digang, et al. Fruit-like fossils of ancient sea weeds from late Ordovician, central area of the Tarim basin and the characters of bioprecursors of Tazhong oil and gas field [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2003, 20(1): 89–96.
- [11] Grantham P J. The occurrence of unusual C_{27} and C_{29} sterane predominances in two types of Oman crude oil [J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(1): 1–10.
- [12] Derenne S, Largeau C, Berkloff C, et al. Non-hydrolysable macromolecular constituents from outer walls of *Chlorella fusca* and *Nanochlorum eucaryotum* [J]. Photochemistry, 1992, 31(6): 1923–1929.
- [13] Milner C W D, Rogers M A, Evans C R. Petroleum transformations in reservoirs [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7(2): 101–153.
- [14] Orozco D S, Horsfield B, Di Primio R. Influence of maturity on distributions of benzo- and dibenzothiophenes in Tithonian source rocks and crude oils, Sonda de Campeche, Mexico [J]. Organic Geochemistry, 1998, 28(7–8): 423–439.
- [15] Fan Pu, Philp R P, Li Zhenxi, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of crude oils and source rocks from different sedimentary environments [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1–3): 427–435.
- [16] 李永福, 何生. 原油芳烃中三芴系列化合物的环境指示作用[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 45–50.
- Li Yongfu, He Sheng. Geochemical characteristics of dibenzothiophene, dibenzofuran and fluorine and their homologues and their environmental indication [J]. Geochimica, 2008, 37(1): 45–50.
- [17] Radke M. Application of aromatic-compounds as maturity indication in source rocks and crude oils [J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5(3): 224–236.
- [18] 朱心健, 陈践发, 伍建军, 等. 塔里木盆地台盆区古生界原油碳同位素组成及油源探讨[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 997–1003.
- Zhu Xinjian, Chen Jianfa, Wu Jianjun, et al. Carbon isotopic compositions and origin of Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 997–1003.
- [19] 常象春, 王铁冠, 李启明, 等. 哈拉哈塘凹陷新垦区块奥陶系油气成藏的地球化学证据[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 44–49.
- Chang Xiangchun, Wang Tiegua, Li Qiming, et al. Hydrocarbon entrapment and accumulation for Ordovician reservoirs from Xinken block of Halahatang depression as constrained from oil geochemistry [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(3): 44–49.
- [20] 王传刚, 王铁冠, 何发歧, 等. 塔河油田原油稳定碳同位素特征及其成藏意义[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(2): 155–157.
- Wang Chuangang, Wang Tiegua, He Faqi, et al. Stable carbon isotope and its significance in hydrocarbon accumulation in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(2): 155–157.
- [21] Dahl J E, Moldovan J M, Peter K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking [J]. Nature, 1999, 399(5): 54–56.
- [22] 马安来, 金之钧, 朱翠山, 等. 塔里木盆地中深1C井原油高聚硫代金刚烷及金刚烷硫醇的检出及意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(10): 1312–1323.
- Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhu Cuishan, et al. Detection and significance of higher thiadiamondoids and diamondoidthiols in oil from the Zhongshen 1C well of the Tarim Basin, NW China [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(10): 1312–1323.
- [23] 马安来, 金之钧, 朱翠山. 塔里木盆地顺南1井原油硫代金刚烷系列的检出及意义 [J]. 石油学报, 2018, 39(1): 42–53.
- Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhu Cuishan, et al. Detection and research significance of thiadiamondoids from crude oil in Well Shunnan 1, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 42–53.
- [24] Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1–2): 143–175.
- [25] Worden R H, Smalley P C. H_2S -producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation, Abu Dhabi [J]. Chemical Geology, 1996, 133(1–4): 157–171.
- [26] Cai Chunfang, Wo Men R H, Wang Qinghua, et al. Chemical and isotopic evidence for secondary alteration of natural gases in the Hetianhe field, Bachu Uplift of the Tarim Basin [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(12): 1415–1427.

- [27] 张建勇,刘文汇,腾格尔. TSR 对气态烃组分及碳同位素组成的影响—高温高压模拟实验的证据[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 66–77.
Zhang Jianyong, Liu Wenhui, Teng Geer. Influences of TSR on gaseous hydrocarbon components and carbon isotopes: revelations from high-temperature and high-pressure simulation experiments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 66–77.
- [28] Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo, et al. Geochemical characteristics of the Zhaolanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1717–1730.
- [29] 马安来,金之钧,朱翠山,等. 塔里木盆地麦盖提斜坡罗斯2井奥陶系油气藏的 TSR 作用:来自分子标志物的证据[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 730–737.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhu Cuishan, et al. Effect of TSR on the crude oil in Ordovician reservoirs of Well Luosi-2 from Maigaiti Slope, Tarim Basin: Evidences from molecular markers[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 730–737.
- [30] 马安来,金之钧,李慧莉,等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层油藏蚀变作用及保存[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1737–1753.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Li Huili, et al. Secondary alteration and preservation of ultra-deep ordovician oil reservoirs of north Shuntuoguole Area of Tarim Basin, NW China[J]. Earth Science, 45(5): 1737–1753.
- [31] 马安来,张水昌,张大江,等. 生物降解原油地球化学研究新进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 449–454.
Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. The advances in the geochemistry of the biodegraded oil [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 449–454.

(编辑 张玉银)

(上接第 903 页)

- [26] 陈践发,苗忠英,张晨,等. 塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 271–276.
Chen Jianfa, Miao Zhongying, Zhang Chen, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gas in the Tabei Uplift of the Tarim Basin and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 271–276.
- [27] 程克明,金伟明,何忠华,等. 陆相原油及凝析油的轻烃单体组成特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(1): 34–44.
Cheng Keming, Jin Weiming, He Zhonghua, et al. Composition characteristics of light hydrocarbons in continental oil and condensate and their geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(1): 34–44.
- [28] Mango F D. The stability of hydrocarbons under the time-temperature conditions of petroleum genesis[J]. Nature, 1991, 352: 146–148.
- [29] Mango F D. The light hydrocarbons in petroleum: A critical review [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(7–8): 417–440.
- [30] 马永生. 普光气田天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 1–6.
Ma Yongsheng. Geochemical characteristics and origin of natural gases from Puguang gas field on Eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 1–6.
- [31] 杨振恒,魏志红,何文斌,等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩现场解吸气特征及其意义[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 156–163.
Yang Zhenheng, Wei Zhihong, He Wenbin, et al. Characteristics and significance of onsite gas desorption from Wufeng-Longmaxi shales in southeastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 156–163.
- [32] 王力,金强,林腊梅,等. 济阳坳陷孤北—渤南地区渤古4潜山天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 715–749.
Wang Li, Jin Qiang, Lin Lamei, et al. The geochemical characteristics of natural gas and discussion on gas source in Bogu 4 buried hill[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 715–749.
- [33] Isahsen G H. Central North Sea hydrocarbon systems: Generation, migration, entrapment, and thermal degradation of oil and gas [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(11): 1545–1572.
- [34] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2): 303–316.
- [35] 孔婷,张敏. C₄–C₈ 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 C₄–C₈ light hydrocarbons in geochemical studies: A case of condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 535–543.
- [36] Radke M, Welte D, 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.
- [37] Hughes W B. Use of thiophenic organosulfur compounds in characterizing crude oils derived from carbonate versus siliciclastic sources[J]. AAPG Studies in Geology, 1984, 17(18): 181–196.
- [38] 苏洲,张慧芳,韩剑发,等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1255–1269.
Su Zhou, Zhang Huifang, Han Jianfa, et al. Origin and controlling factors of Mesozoic Cenozoic gas condensates with high wax content and high gravity oil in Kuqa Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1255–1269.
- [39] 罗健,程克明,付立新,等. 烷基二苯并噻吩——烃源岩热演化新指标[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 27–32.
Luo Jian, Cheng Keming, Fu Lixin, et al. Alkylated dibenzothiophene index—A new method to assess thermal maturity of source rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(3): 27–32.

(编辑 梁慧)