

文章编号:0253-9985(2012)06-0828-08

塔中 I 号坡折带顺西区块顺 7 井油气地球化学特征及来源

马安来¹, 金之钧¹, 李婧婧¹, 朱秀香²

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石化 西北油田分公司 石油勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:在塔中 I 号坡折带顺西区块顺 7 井的中、下奥陶统鹰山组获得了凝析油与天然气。凝析油具有饱和烃含量高、芳烃含量低、非烃沥青质含量低的特点, 饱芳比和非沥比分别为 13.51 和 18.50。凝析油 Pr/Ph 比为 1.16, 庚烷值和异庚烷值分别为 33% 和 3.8, 为高成熟凝析油。在生物标志物组成上, 由于成熟度较高, 藿烷系列基本消失, 三环萜烷以 C₁₉ 三环萜烷为主峰。凝析油具有较重的碳同位素, 全油碳同位素值为 -29.6‰, 与公认的寒武系生源的塔东 2 井原油具有相近的碳同位素值, 因而凝析油可能来源于寒武系烃源岩。顺 7 井天然气为湿气, 天然气甲烷碳同位素值仅为 -51.7‰, 与 TZ45 井奥陶系天然气甲烷碳同位素值相近; 天然气组分同位素值分布呈现正碳同位素序列。该天然气的来源可能为上奥陶统烃源岩。

关键词:成熟度; 碳同位素; 生物标志物; 顺 7 井; 奥陶系; 寒武系; 塔里木盆地

中图分类号: TE132.4

文献标识码: A

Geochemical characteristics and origin of hydrocarbons in the Well Shun-7 of western Shuntuoguole Block, Tarim Basin

Ma Anlai¹, Jin Zhijun¹, Li Jingjing¹ and Zhu Xiuxiang²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Northwest Oilfield Branch Corporation, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Condensate oil and natural gas were tested in the Yingshan Formation of the Lower-Mid Ordovician in well Shun-7 of western Shuntuoguole Block in Tazhong- I faulted-slope-break zone, Tarim Basin. The condensate oil features in high content of saturate hydrocarbon and low content of aromatic hydrocarbon and non-hydrocarbon asphaltene. The ratio of saturate hydrocarbon to aromatic hydrocarbon and non-hydrocarbon to asphaltene are 13.51 and 18.50, respectively. The Pr/Ph value is about 1.16 and the heptane and isoheptane values are 33% and 3.8 respectively, indicating high maturity of the condensate oil. As the maturity is high, hopanes series basically disappear and tricyclic terpanes is dominated by C₁₉-tricyclic terpanes. The carbon isotope of the condensate oil from well Shun-7 is -29.6‰ and is similar to that of the Cambrian-sourced oil from well TD-2, indicating the condensate oil of well Shun-7 might originated from the Cambrian source rocks. The wet gas of the well Shun-7 has a methane carbon isotope value of -51.7‰, which is similar to that of the gas from the Ordovician in well TZ-45. The distribution of carbon isotopes of the gas components shows a normal carbon isotope sequence (i.e., $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$) indicating the gas may come from the Upper Ordovician source rocks.

Key words: maturity, carbon isotope, biomarker, Well Shun-7, Ordovician, Cambrian, Tarim Basin

收稿日期: 2011-08-12; 修订日期: 2012-10-15。

第一作者简介: 马安来(1969—), 男, 博士, 副教授, 石油地球化学与油气成藏。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2005CB422108); 国家科技重大专项(2011ZX05-031-003)。

1 地质背景

多年的勘探实践表明塔里木盆地塔中I号断裂坡折带是控制地层沉积、储层发育、油气运移及成藏的有利区带^[1-5]。顺托果勒西(顺西)区块位于塔中I号断裂坡折带西段(图1)。邻区中石油塔中86—塔中45区块在上奥陶统良里塔格组获得高产油气流,中-下奥陶统鹰山组见到良好的油气显示^[1-2,4-5]。顺7井主要探索奥陶系碳酸盐岩“串珠”状地震响应特征与储层的关系,主探层位是上奥陶统良里塔格组和中、下奥陶统鹰山组。在6 820~6 912 m裸眼酸压获油气流。

2 样品与实验

实验中称取适量原油加入正己烷,加入适量的 $nC_{24}D_{50}$, D_4C_{27} 胆甾烷, D_{10} 蒾和 D_{16} 单金刚烷用于链烷烃、生物标志物、芳烃化合物及金刚烷化合物绝对定量的内标物。静置24 h,分离出沥青质,然后采用柱色层法,依次用正己烷、正己烷和二氯

甲烷混合溶液、正己烷和甲醇混合溶液冲洗获得饱和烃、芳香烃和非烃。全油和轻烃色谱是在HP6890色谱仪上进行的,据SY/T 5779—2008进行检测。饱和烃、芳烃色谱-质谱是在HP6890/5975 GC-MS仪器上进行的,HP5色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。饱和烃色-质升温程序:50℃恒温1 min,以20℃/min升温至100℃,以3℃/min升温至315℃,恒温16.83 min。芳烃色-质升温程序为50℃恒温1 min,以3℃/min升温至315℃,恒温15.67 min。载气为氦气,EI电子轰击方式,多离子检测。金刚烷化合物绝对定量方法见文献[6]。天然气测试采用钢瓶气,组分碳同位素检测仪器为MAT253,据GB/T 18340.2—2001进行检测。

3 结果与讨论

3.1 原油地球化学特征

3.1.1 物理性质与族组成

顺7井原油为凝析油,20℃密度为0.774 9~

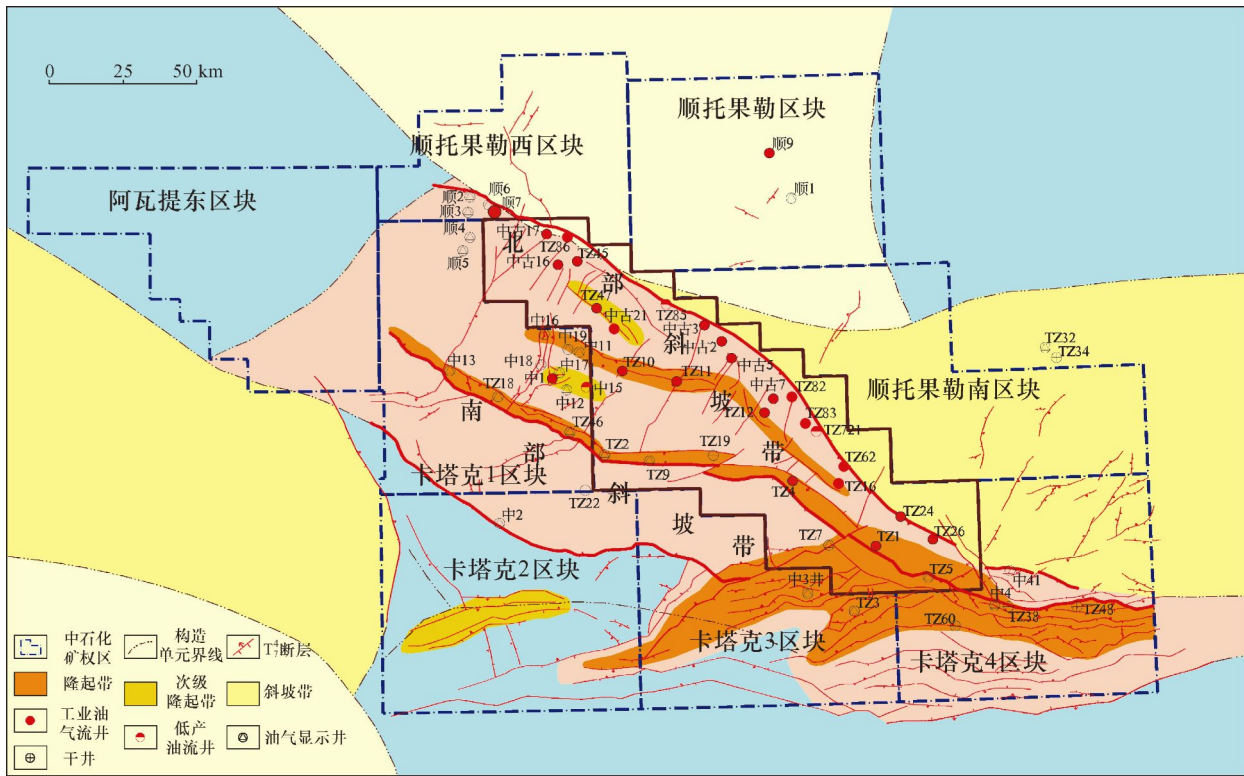


图1 塔中I号坡折带顺西区块顺7井井位

Fig. 1 Location of Well Shun-7 in western Shuntuoqile Block in Tazhong-I faulted-slope-break zone

表1 塔中I号坡折带顺西区块顺7井和卡1区块中1井原油族组成

Table 1 Group components of the oils from the Well Shun-7 in western Shuntuoluole Block and the Well Zhong-1 in Katake 1 Block

井号	井深/m	层位	族组成含量/%				饱芳比	非沥比
			饱和烃	芳烃	非烃	沥青质		
顺7	6 820.0~6 912.0	O ₁₊₂ y	86.62	6.41	0.74	0.04	13.51	18.50
中1*	5 250.0~5 373.0	O ₁₊₂ y	46.40	11.93	2.51	0.29	3.89	8.65
中1	5 273.5~5 249.5	O ₁₊₂ y	63.22	35.64	0.64	0.50	1.77	1.28

注: * 为传统的柱分离方法,轻质组分损失,闭合度小于70%。

0.787 0 g/cm³,粘度为 1.61 mPa · s,硫含量为 0.11%,蜡含量为 5.98%,凝固点为 -4 ℃,原油具有硫化氢气味。

顺7井原油具有饱和烃含量高(>85%),芳烃含量低(<10%),非烃和沥青质含量低的特点(表1),原油具有很高的饱芳比和非沥比值。与中石化在卡1区块获得突破的中1井原油相比较,顺7井原油的饱和烃含量明显高于中1井原油,而其芳烃的含量则明显低于中1井。

3.1.2 全油色谱特征

图2是顺7井全油色谱图,从全油色谱图可以看出基线平直,且色谱呈现单峰分布。正构烷烃丰度为 180×10^{-3} 。从色谱参数来看,顺7井奥陶系原油正构烷烃碳数最高达 nC₃₂,CPI值(碳优势指数)为 1.03,为成熟原油,C₂₁-/C₂₂₊为 5.92,显示了以低碳数正构烷烃占优势的特点,表明原油的成熟度较高。原油的 Pr/Ph 值为 1.16,显示了弱氧化-弱还原的沉积环境。

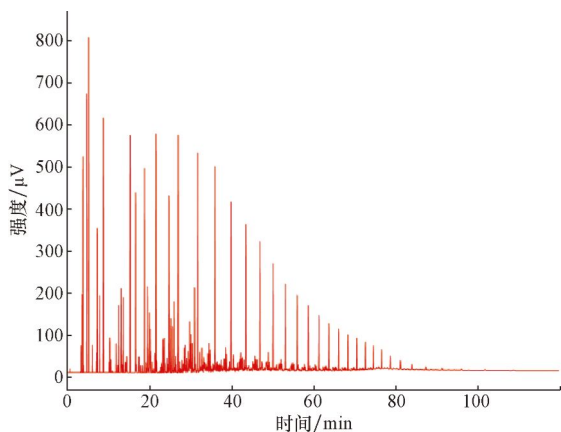


图2 塔中I号坡折带顺西区块顺7井原油全油气相色谱

Fig. 2 Gas chromatogram of the whole oil from the well Shun-7 in Tazhong-I faulted-slope-break zone

3.1.3 轻烃组成

庚烷值和异庚烷值是常用的轻烃成熟度参数^[7-8]。一般成熟原油的庚烷值和异庚烷值分别介于20%~30%和2~3区间,大于这一数值或低于这一数值的原油被认为是高成熟原油或低成熟原油。但是,这两项参数受生物降解作用的制约,即生物降解油的轻烃成熟度参数且趋于偏小。顺7井原油的庚烷值在33%以上,异庚烷值为3.8,表明顺7井原油为高成熟油范畴。

Bement等^[9]在4个不同构造类型盆地中,采用5套不同时代生油岩的C₇轻烃资料,利用镜质体反射率(R_o)作为地质温度计,对2,4-/2,3-二甲基戊烷(DMP)轻烃组分的温度参数进行了地质校正,求取生油层的最大埋深温度,建立了生油层最大埋深温度与2,4-/2,3-DMP含量比的函数关系式,并得出该项轻烃温度参数不受盆地类型、热史(有效受热时间)、生油层时代、干酪根类型和岩性等因素影响的结论。

基于Bement的研究工作,Mango^[8]推导出生油层最大埋藏温度(T)与2,4-/2,3-DMP含量比的函数方程,即:

$$T = 140 + 15 \ln(2,4-/2,3-DMP) \quad (1)$$

式中:T为生油层最大埋藏温度,℃。

运用Mango(1997)建立的上述函数方程,计算顺7井原油生成温度为135℃。

3.1.4 生物标志物

在甾萜烷生物标志物组成上(图3),顺7井原油由于成熟度较高,甾烷、藿烷系列基本裂解。在m/z 191质量色谱图中,藿烷系列仅存在C₃₀和C₂₉藿烷,C₃₀藿烷绝对含量仅为 4×10^{-6} ,Tm化合物完全消失,Ts/(Ts+Tm)=1,表明原油的成熟度在

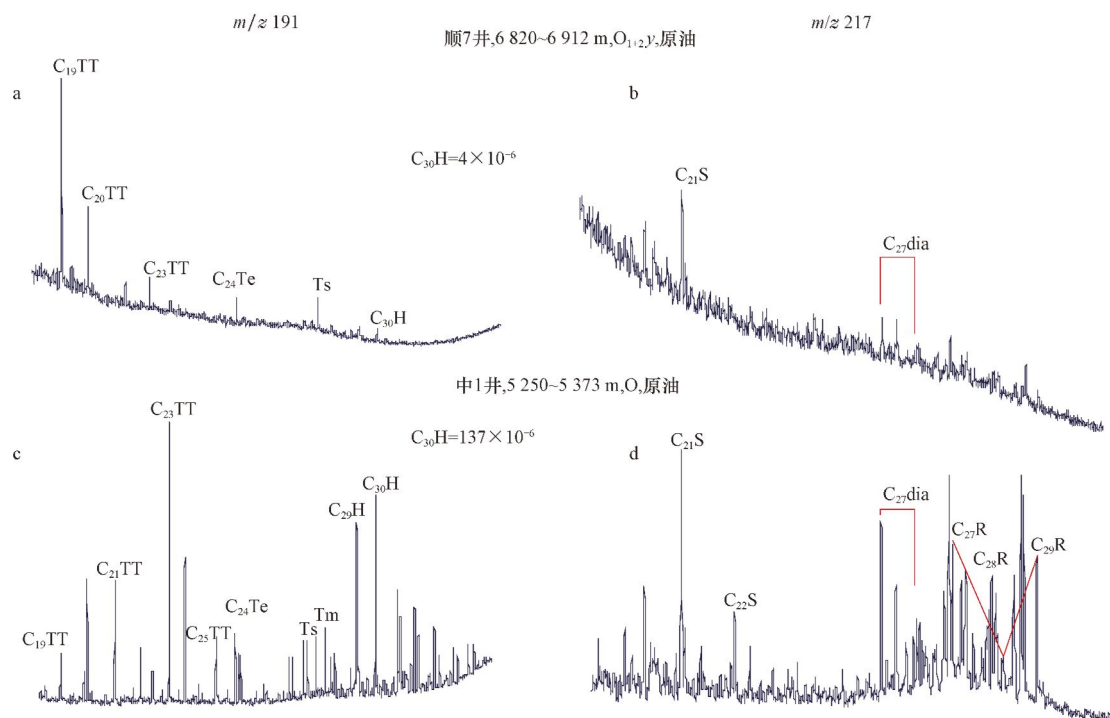


图3 塔中I号坡折带顺西区块顺7井与卡1区块中1井原油 m/z 191, m/z 217 质量色谱

Fig. 3 Mass chromatogram of m/z 191 and m/z 217 from the oils of the well Shun-7 in western

Shuntuoguole Block and the well Zhong-1 in Katake 1 Block

TT. 三环萜烷; Te. 四环萜烷; Ts. 18 α (H)-三降萜烷; Tm. 17 α (H)-三降萜烷; H. 藿烷; S. 甾烷; dia. 重排甾烷; R. 生物构型

1.3%左右^[10];三环萜烷系列分布不完整,仅可见 C_{19} , C_{20} 和 C_{23} 三环萜烷,且以 C_{19} 三环萜烷为主峰;甾烷系列仅可检测出 C_{21} 孕甾烷及少量的 C_{27} 重排甾烷, C_{29} 规则甾烷隐约可见。与卡1区块中1井奥陶系原油相比较,可以看出顺7井原油与中1井原油存在很大区别,中1井原油具有较高的生标绝对含量, C_{30} 藿烷绝对含量为 137×10^{-6} ,中1井原油 C_{28} 甾烷含量低、重排在烷含量高、 C_{29} 藿烷含量高、伽马蜡烷含量低,三环萜烷以 C_{23} 三环萜烷为主峰。

3.1.5 金刚烷类化合物特征

金刚烷类化合物由于具有类似金刚石结构的一类刚性聚合环状烃类化合物,一旦形成,性质极为稳定,具有很强的抗热降解能力和抗生物降解能力。早期应用 1-甲基单金刚烷/(1-甲基+2-甲基)-单金刚烷和 4-甲基-双金刚烷/(1-甲基+3-甲基+4-甲基)-双金刚烷判断成熟度^[11],Dahl 等^[12]利用 4-甲基+3-甲基-双金刚烷化合物绝对含量判断原油的裂解程度。顺7井凝析油中 1-甲基/(1-甲基+2-甲基)-单金刚

烷和 4-甲基/(1-甲基+3-甲基+4-甲基)-双金刚烷比值分别为 0.73 和 0.47,折算等效镜质体反射率达 1.3%~1.6%。该原油的 3-甲基+4-甲基-双金刚烷含量可达 73×10^{-6} , $\alpha\alpha\alpha$ -20R- C_{29} 甾烷含量基本为 0。顺7井原油甲基双金刚烷含量远高于塔河九区奥陶系凝析油及高蜡原油中 3-甲基+4-甲基-双金刚烷含量^[6],根据 Dahl 等提出的原油裂解定量评价模板^[12],顺7井奥陶系原油的裂解程度在 70%左右。

3.1.6 芳烃组成

顺7井原油芳烃化合物主要以萘、菲、硫茚、茚、联苯、氧茚系列为主,其他化合物含量相对较低,总芳烃化合物绝对含量为 8710×10^{-6} ,这一含量基本与中1井芳烃化合物总量为 9210×10^{-6} 相当。在三茚系列组成中,以高含硫茚、低氧茚含量为特征。相对组成与塔河奥陶系原油没有明显的差别,但在绝对含量上,顺7井原油硫茚系列含量为 1310×10^{-6} ,高于塔河油田奥陶系原油硫茚含量平均值为 866×10^{-6} 。反映原油成熟度的甲基菲指数 $MPI1$ [1.5(2-甲基菲+3-甲基菲)/

(菲+1-甲基菲+9-甲基菲)]为1.74,换算等效的镜质体反射率为1.03%,而中1井甲基菲指数MPII为0.74,换算的等效镜质体反射率为0.84%。

3.1.7 碳同位素组成

顺7井原油最为重要的特征是原油碳同位素偏重,全油碳同位素、饱和烃、芳烃、非烃与沥青质稳定碳同位素分别为-29.6‰, -30.3‰, -28.0‰, -29.6‰和-29.2‰(图4)。这一结果与塔里木盆地公认的寒武系生源的TD2井原油、乌鲁木齐油苗馏分碳同位素值分布在相近的范围^[13-14]。而与中1井原油碳同位素比值明显不同,中1井原油及组分碳同位素分别为-33.2‰, -33.5‰, -32.7‰, -30.5‰和-30.8‰。

3.1.8 原油来源

塔里木盆地发育3套烃源岩:寒武系、中-下奥陶统(黑土凹组和萨尔干组)和上奥陶统烃源岩(良里塔格组和印干组)。中-下奥陶统分子标志物特征组成上与寒武系具有较强的相似性,上奥陶统良里塔格组烃源岩在分子标志物组成上与寒武系、中-下奥陶统具有最为明显的差异^[15]。寒武系、中-下奥陶统烃源岩在分子标志物组成上具有“六高一低”的特征:甲藻甾烷、三芳甲藻甾烷、24-降胆甾烷、伽马蜡烷、4-甲基-24-乙基-胆甾烷和C₂₈甾烷含量高,重排甾烷含量低;而上奥陶统良里塔格组烃源岩则具有相反的特征^[13-19]。

然而由于在塔中地区不少原油的生物标志物含量低,用上述生物标志物判识油源存在困难。李素梅等^[19-20]运用正构烷烃单体烃同位素结合分子化合物组成将塔中地区的原油分为4类:第一类原油具有寒武系-下奥陶统成因特点,以TZ62井志留系残留古油藏为代表,具有C₂₈甾烷含量高和重碳同位素的特点,特别是正构烷烃不同碳数碳同位素值介于-29.0‰~-30.0‰,与TD2井原油碳同位素相近;第二类原油具有中-上奥陶统(即良里塔格组)来源,塔中仅以TZ825井奥陶系储层方解石包裹体为代表;第三类原油为高含二苯并噻吩的原油,以TZ4井区原油为代表;第四类原油为I和II类原油的混源油,识别依据是正构烷烃单体碳同位素介于I和II类原油之间,与中-上奥陶统成因原油更为接近,一般为-33.4‰~-32.0‰。进一步可将第IV类原油划为3个亚类:IV-1类原油主要分布在塔中I号坡折带,主要特征是原油链烷烃绝对丰度高、甾烷和藿烷类浓度总体不高、重排甾烷与重排藿烷丰度较高、三芳系列绝对浓度较高、饱和烃Ts/(Ts+Tm)相对较高,三甲基萘和四甲基萘比值较高;IV-2类原油主要分布在TZ47至塔中15井区,分子标志物特征与IV-1类特征相反;IV-3类原油生物标志物与寒武系成因原油更为接近,但正构烷烃单体烃同位素明显偏轻。

由于顺7井原油中寒武系-奥陶系的分子标志物含量很少,根据全油及组分的碳同位素与寒武系来源的TD2井原油具有较强的相似性,认为顺7井原油来源于寒武系烃源岩。

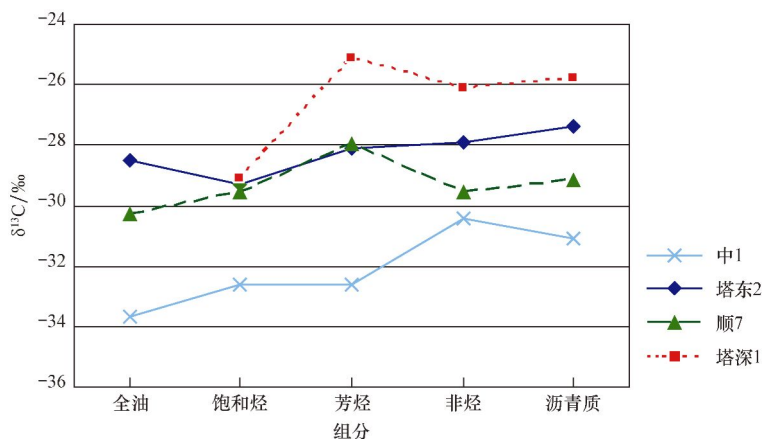


图4 塔中I号坡折带顺7井和中1井等原油组分碳同位素分布

Fig. 4 Carbon isotope of oil components of well Shun-7 and Zhong-1 from Tazhong-I faulted-slope-break zone

3.2 天然气地球化学特征

3.2.1 组成特征

顺7井天然气甲烷含量为83.14%(表2),略低于卡1区块中1井奥陶系天然气,顺7井天然气 C_{2+} 含量较高,为6.64%,高于中1井2.47%~2.52%的 C_{2+} 含量。顺7井天然气 $C_1/(C_1-C_5)$ 比值为0.926,低于中1井0.980的 $C_1/(C_1-C_5)$ 比值。按照天然气划分标准^[21],把甲烷含量大于95%, C_{2+} 重烃含量不超过1%~4%,干湿指数大于19的烃类气体划分为干气。顺7井天然气为湿气,而中1井原油为干气。

3.2.2 碳同位素组成

天然气乙烷和丙烷碳同位素值 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 是区别油型气和煤型气的重要标志之一。国内研究者多以 $\delta^{13}C_2 = -28.0\text{‰}$ 为区分腐殖型气与腐泥型气的标准^[21]。顺7井奥陶系天然气乙烷同位素为 -32.5‰ ,低于 -28.0‰ 的油型气的界限值(表3),丙烷碳同位素值为 -28.2‰ ,也远小于 -23.2‰ 的油型气的界限值。从乙烷和丙烷碳同位素来看,顺7井奥陶系天然气为典型的油型气。利用前人提出的天然气成因类型的模板,均可将

顺7井天然气划分为油型气(图5)。

顺7井奥陶系天然气烷烃碳同位素值分布呈现正碳同位素分布序列。

图6是顺7井天然气烃类 $1/n$ 与 $\delta^{13}C_n$ 之间的关系。从图中可以看出,顺7井天然气烃类的 $\delta^{13}C_n$ 与 $1/n$ 之间呈现近似的线性关系,表明天然气为单一来源,是相同母质在单一营力作用下的产物。

3.2.3 天然气气源

顺7井天然气中,甲烷碳同位素偏轻,仅为 -51.7‰ ,甲烷、乙烷碳同位素差值大, $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 为 -18.0‰ 。目前塔中北坡地区中-上奥陶统地层的成熟度在0.9%~1.2%,而寒武系地层成熟度在1.5%以上^[22-28]。从天然气组分组成来看,气源岩的成熟度不高,不可能来源于寒武系烃源岩。对塔中北坡TZ45井奥陶系天然气具有异常偏轻的甲烷碳同位素,郭建军等^[22]提出TZ45井天然气混入了少量的生物气。但从油气藏地质特征来看,不支持顺7井天然气为生物气。顺7井奥陶系天然气甲烷、乙烷碳同位素数据点分布在海相偏腐殖型天然气范围内,反映天然气可能来源于塔中北斜坡的中-上奥陶统偏腐殖型烃源岩。

表2 塔中I号坡折带顺西区块顺7井和卡1区块中1井天然气组成

Table 2 Natural gas components of Well Shun-7 in West Shuntuoguole Block and Well Zhong-1 in Katake 1 Block

井号	井深/m	层位	密度/ (g/cm ³)	组分含量/%					
				N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂₊	C ₁ /(C ₁ -C ₅)	C ₁ /(C ₁ +C ₂)
顺7	6 820.0~6 912.0	O ₁₊₂ Y	0.774 9	1.49	8.12	83.14	6.64	0.93	0.96
中1	5 349.5~5 373.5	O ₁₊₂ Y	0.640 0	7.36	1.61	88.35	2.47	0.98	0.99
中1	5 349.5~5 373.5	O ₁₊₂ Y	0.640 0	7.24	1.63	88.39	2.52	0.98	0.99

注:两个中1的测试时间不同。

表3 塔中I号坡折带顺7井和TZ45井天然气稳定碳同位素分布

Table 3 Stable carbon isotopes of natural gas from the well Shun-7 and the well TZ-45 in Tazhong-1 faulted-slope-break zone

井号	井深/m	层位	$\delta^{13}C/\text{‰}$						
			C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	C ₄	CO ₂	C ₂ -C ₁
顺7	6 820~6 912	O ₁₊₂ Y	-51.7	-32.5	-28.2	-28.8		2.7	19.2
TZ45 *	6 020~6 150	O ₁₊₂ Y	-54.4	-38.2	-32.0		-30.7		16.2

注:*为TZ45井天然气稳定碳同位素值采用文献[22]的数据。

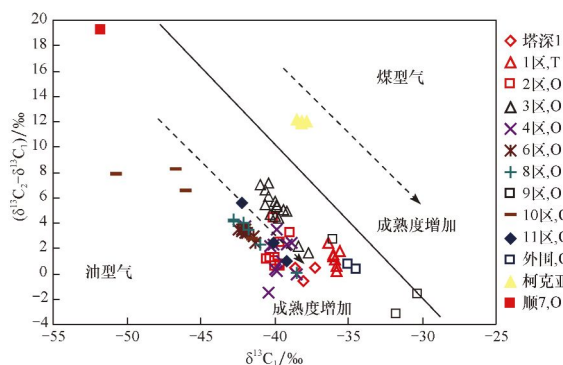


图5 塔中I号坡折带顺7井天然气与塔河油田奥陶系天然气 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 之间的关系

Fig. 5 Correlation of $\delta^{13}C_1$ and $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ between natural gas from the well Shun-7 in Tazhong-I faulted-slope-break zone and that from the Ordovician in Tahe oilfield

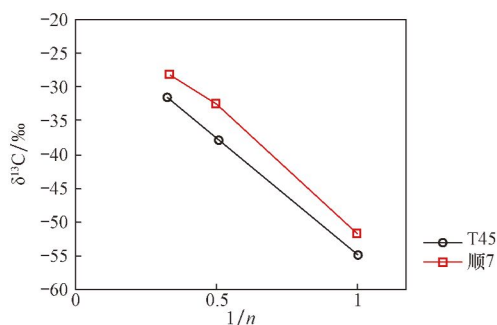


图6 塔中I号坡折带顺7井奥陶系天然气组分 $1/n$ 与 $\delta^{13}C_n$ 之间的关系^[22-23]

Fig. 6 Relations between the $1/n$ component and $\delta^{13}C_n$ of natural gas from the well Shun-7 in Tazhong-I faulted-slope-break zone

4 结论

1) 顺7井鹰山组原油为凝析油,庚烷值和异庚烷值表明原油具有较高的成熟度。由于原油成熟度较高,生物标志物藿烷系列裂解。凝析油具有较重的碳同位素值,与目前塔里木盆地公认的寒武系生源的TD2井原油具有可比性,从同位素组成上看,顺7井原油来源于寒武系烃源岩。

2) 顺7井中-下奥陶统鹰山组天然气为湿气,天然气为有机成因的油型气。其组分碳同位素特征与塔中I号坡折带的TZ45井奥陶系天然气具有较强的相似性。根据天然气组成、同位素以及塔中地区烃源岩的演化程度,认为顺7井鹰山组天然气来源于中-上奥陶统烃源岩。

参考文献

- [1] 周新源,王招明,杨海军,等.塔中奥陶系大型凝析气田的勘探与发现[J].海相油气地质,2006,11(1):45-51.
Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 5): Tazhong Ordovician Condensate field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(1): 45-51.
- [2] 孙龙德,李曰俊,江同文,等.塔里木盆地塔中低凸起:一个典型的复式油气聚集区[J].地质科学,2007,42(3):602-620.
Sun Longde, Li Yuejun, Jiang Tongwen, et al. The central Tarim lower uplift: a composite hydrocarbon accumulation play in the Tarim Basin, NW China [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 602-620.
- [3] 庞雄奇.中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法意义[J].石油与天然气地质,2010,31(5):517-534.
Pang Xiongqi. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 517-534.
- [4] 张鼎,赵瑞华,张蒂嘉,等.塔中I号带奥陶系烃包裹体荧光特征与成藏期[J].石油与天然气地质,2010,31(1):63-68.
Zhang Nai, Zhao Ruihua, Zhang Dijia, et al. Fluorescence characteristics of the Ordovician hydrocarbon inclusions in the Tazhong-I slope-break zone and the timing of hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 63-68.
- [5] 杨俊,姜振学,向才富,等.塔里木盆地塔中83-塔中16井区碳酸盐岩油气特征及其成因机理[J].石油与天然气地质,2012,33(1):101-110.
Yang Jun, Jiang Zhenxue, Xiang Caifu, et al. Carbonate reservoir characteristics and their genetic mechanisms in Tazhong 83-Tazhong 16 wellblock, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 101-110.
- [6] 马安来,金之钧,朱翠山,等.塔河油田原油中金刚烷化合物绝对定量分析[J].石油学报,2009,30(2):214-218.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhu Cuishan, et al. Quantitative analysis on absolute concentration of diamondoids in oils from Tahe oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 214-218.
- [7] Mango F D. The light hydrocarbon in petroleum; a critical review [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(7/8): 417-440.
- [8] 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.
- [9] Bement W O. The temperature of oil generation as defined with C_7 chemistry maturity parameter ($2,4 - DMP/2,3 - DMP$ ratio) // [C]. Grimalt J O, Dorronaoro C. Organic geochemistry: developments and applications to energy, climate, environment and human history. Donostia-San Sebastian: European Association of

- Organic Geochemists,505–507.
- [10] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide volume 2[M]. Cambridge University Press,2004.
- [11] Chen J H, Fu J M, Shen G Y, et al. Diamondoid hydrocarbon ratios; novel maturity indices for highly mature crude oils[J]. Organic Geochemistry,1996,25(3–4):179–190.
- [12] Dahl J E, Moldowan J M, Peters K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking[J]. Nature,1999,399(5):54–57.
- [13] 马安来,张水昌,张大江,等.塔里木盆地塔东2井稠油有机地球化学特征[J].新疆石油地质,26(2):148–151.
Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. Organic Geochemistry of TD–2 well in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2005,26(2):148–151.
- [14] 卢玉红,钱玲,张海祖,等.塔里木盆地阿瓦提凹陷乌鲁桥油田地化特征及来源[J].海相油气地质,2008,13(2):45–51.
Lu Yuhong, Qian Ling, Zhang Haizu, et al. Origin and Geochemical characteristic of Wuluqiao oil seepage in Awati Sag, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2008,13(2):45–51.
- [15] 马安来,金之钧,张水昌,等.塔里木盆地寒武–奥陶系烃源岩的分子地球化学特征[J].地球化学,2006,35(6):593–601.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhang Shuichang, et al. Molecular geochemical characteristic of Cambrian-Ordovician source rock in Tarim Basin, NW China[J]. Geochimica,2006,35(6):593–601.
- [16] 张水昌,王飞宇,张宝民,等.塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究[J].石油学报,2000,21(6):23–28.
Zhang Shuichang, Wang Feiyu, Zhang Baomin, et al. Middle-upper Ordovician source rock geochemistry of the Tarim Basin, [J]. Acta Petrolei Sinica,2000,21(6):23–28.
- [17] 马安来,张水昌,张大江,等.轮南-塔河油田稠油油源对比研究[J].石油与天然气地质,2004,25(1):31–38.
Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. Oil and source correlation in Lunnan and Tahe heavy oil fields[J]. Oil & Gas Geology,2004,25(1):31–38.
- [18] 马安来,金之钧,王毅.塔里木盆地台盆区海相油源对比存在的问题及进一步工作方向[J].石油与天然气地质,2006,27(3):356–362.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Wang Yi. Problems of oil-source correlation for marine reservoirs in Paleozoic craton area in Tarim basin and future direction of research[J]. Oil & Gas Geology,2006,27(3):356–362.
- [19] 李素梅,庞雄奇,杨海军,等.塔中I号坡折带高熟油气地球化学特征及其意义[J].石油与天然气地质,2008,29(2):210–216.
Li Sumei, Pang Xiongqi, Yang Haijun, et al. Geochemical characteristics and implication of high thermal maturity oils in Tazhong-I faulted slope break zone[J]. Oil & Gas Geology,2008,29(2):210–216.
- [20] 李素梅,庞雄奇,杨海军,等.塔中隆起原油特征与成因类型[J].地球科学—中国地质大学学报,2008,22(5):635–642.
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Yang Haijun, et al. Characteristics and genetic type of the oils in the Tazhong uplift[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience,2008,33(5):635–642.
- [21] 戴金星,邹才能,张水昌,等.无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J].中国科学,2008,38(11):1329–1341.
Dai Jinxing, Zou Caineng, Zhang Shuichang, et al. Identification of organic and inorganic genetic natural gas[J]. Science in China (D series),2008,38(11):1329–1341.
- [22] 郭建军,陈践发,朱雷,等.塔里木盆地塔中天然气的地球化学特征及其成因[J].石油实验地质,2007,29(6):577–582.
Guo Jianjun, Chen Jianfa, Zhu Lei, et al. Geochemical characteristics and genesis of the natural gas in the Tazhong Uplift, The Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2007,29(6):577–582.
- [23] 王祥,张敏,刘玉华.塔里木盆地塔中地区天然气成因及差异[J].石油与天然气地质,2010,31(3):335–342.
Wang Xiang, Zhang Min, Liu Yuhua. Origins of natural gas in Tazhong area, the Tarim Basin and their differences[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(3):335–342.
- [24] 吕海涛,耿锋,伍齐乔.塔里木盆地阿瓦提地区阿北1井三叠系高含有机碳泥岩的发现意义[J].石油实验地质,2011,33(6):587–591.
Lü Haitao, Geng Feng, Wu Qiqiao. Discovery significance of Triassic dark mudstone rich in organic carbon, well AB1, Avat area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,33(6):587–591.
- [25] 杨锐,彭德堂,潘仁芳,等.鄂尔多斯盆地西南部上古生界盒8段物源分析[J].石油地质与工程,2012,26(3):1–5.
Yang Rui, Peng Detang, Pan Renfang, et al. Sediment provenance analysis of the 8th member of the upper Paleozoic Xiashihezi formation in the southwest area of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering,2012,26(3):1–5.
- [26] 林小云,高慧娉,魏县娟子,等.资福寺洼陷烃源岩特征与生烃潜力评价[J].石油地质与工程,2011,25(2):1–4.
Lin Xiaoyun, Gao Haiping, Wei Tanjuan, et al. Hydrocarbon source rock characteristics and hydrocarbon generation potential analysis in Zifusi sag [J]. Petroleum Geology and Engineering,2011,25(2):1–4.
- [27] 王琳,周文,何胡军.川北地区二叠系生物礁储层特征研究[J].石油地质与工程,2011,25(1):28–31.
Wang Lin, Zhou Wen, He Hujun. Study on the Permian reef reservoir features in northern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering,2011,25(1):28–31.
- [28] 张永贵,宋在超,周小进,等.琼东南盆地南部中新统生物礁的识别[J].石油实验地质,2011,33(3):307–309.
Zhang Yonggui, Song Zaichao, Zhou Xiaojin, et al. Identification of reef in Miocene, south of Qiongdongnan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,33(3):307–309.