

文章编号: 1001-6112(2007)04-0329-05

塔里木盆地塔深 1 井寒武系油气地球化学特征

翟晓先¹, 顾 忆², 钱一雄², 贾存善², 王 杰², 蔺 军¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要:塔深 1 井是中国及亚洲陆上最深的探井。在埋深 8 400 m 左右、温度 160 °C、压力 80 MPa 环境下的上寒武统白云岩溶洞储集体中发现了褐黄色的液态烃。研究表明, 井深 6 800~7 358 m 的下奥陶统一上寒武统气样的烃类气体含量为 97%, 干燥系数为 0.97, 甲烷碳同位素平均值为 -37.9‰, 对应的气源岩 R_o 为 1.65%~1.91%, 属于典型高演化油型干气, 天然气轻烃指纹分析表明与塔河天然气具有相似的母质来源; 塔深 1 井 (8 406.4~8 407.37 m) 液态烃的正构烷烃齐全, OEP 为 1.029, C_{21}^- / C_{21}^+ 为 0.49~1.46, Pr/Ph 为 0.762~0.991, 具有植烷优势, 反映了还原—强还原环境的海相腐泥型烃源岩; 从表征原油成熟度变化的 Pr/ nC_{17} , Pr/ nC_{18} 及芳烃甲基菲指数等分析, 与塔河油田奥陶系原油有较大区别, 与来自中下寒武统烃源岩的塔东 2 井、T904 井原油相似, 其族组分碳同位素 $\delta^{13}C$ 分布于 -29.13‰~-25.84‰, 具 $C_{27} > C_{28} \ll C_{29}$ 甾烷特征, 初步认为其来自于中下寒武统烃源岩, 而高地层压力可能是其保存的重要原因。

关键词: 天然气; 液态烃; 油气成因; 寒武系; 塔深 1 井; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE CAMBRIAN OIL AND GAS IN WELL TASHEN 1, THE TARIM BASIN

Zhai Xiaoxian¹, Gu Yi², Qian Yixiong², Jia Cunshan², Wang Jie², Lin Jun¹

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

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: The Well Tashen 1 in Tarim Basin is the deepest subaerial well both in China and in Asia. The brown liquid hydrocarbon had been first discovered in the Upper Cambrian dolomite pore and cave with the formation temperature being 160 °C, the formation pressure being 80 MPa and the buried depth being 8 400 m. The systematic geochemical analysis on the gas and liquid hydrocarbon from the Lower Ordovician to the Upper Cambrian in Well Tashen 1 shows that the content of hydrocarbon gas is 97 percent, the dryness factor of the gas is 0.97 and the average carbon isotope of CH_4 is -37.9‰. The R_o of the correspondent source rock is from 1.65% to 1.91%, which is characteristic of typical oily dry gas with high thermal maturity. Various biomarkers and distribution of isotope of petroleum family composition in the saturated fraction from extracts of two samples in Well Tashen 1 indicate that the distribution of n-alkanes is complete (from nC_{13} to nC_{38} with the C_{23} being dominant), the OEP is 1.029, the C_{21}^- / C_{21}^+ is from 0.49 to 1.46 and the ratio of Pr to Ph (Pr/Ph) is from 0.762 to 0.991 with a predominance of phytane, suggesting a marine sapropelic source rock under the reduction to strong reduction environment. On the other hand, the parameters representing thermal maturity of biomarkers, such as Pr/ nC_{17} , Pr/ nC_{18} and MPI, show the great difference between the Ordovician oil in Tahe oilfield and the liquid hydrocarbon in Well Tashen 1. The latter mostly like to the oils in Well Tadong 2 and Well T904 that is believed to come from the Middle and Lower Cambrian source rock. In addition, the liquid hydrocarbon in Well Tashen 1 is characteristic of sterane $C_{27} > C_{28} \ll C_{29}$ and the isotope of petroleum family composition in the saturated fraction is -29.13‰ to -25.84‰. It can be inferred that the liquid hydrocarbons in the Upper Cambrian dolomite mostly come from the Middle and Lower Cambrian source rock and the high formation pressure is an important reason of the hydrocarbon being preserved in the deep buried formation.

Key words: gas; liquid hydrocarbon; origin of hydrocarbon; the Cambrian; Well Tashen 1; the Tarim Basin

收稿日期: 2007-02-14; 修订日期: 2007-06-18。

作者简介: 翟晓先(1956—), 男(汉族), 教授级高级工程师, 主要从事石油地质综合研究。

塔深 1 井是中国石化西北油田分公司在塔里木盆地于 2006 年 7 月历时 462 天完成的国内及亚洲陆上最深的探井,其目的是为探索阿克库勒凸起东缘寒武系建隆性质及其含油气性。该井完井层位上寒武统,井深 8 408 m。钻井见多层油气显示,其中,在奥陶系蓬莱坝—上寒武统(6 800~7 358 m)中测气举见天然气流,可点燃;在埋深 8 404~8 406 m,温度 160 ℃,压力 80 MPa 的环境下,于上寒武统白云岩溶洞中的储集体中发现了呈褐黄色的液态烃。在相对中高温压条件下深层液态烃的发现及其地球化学特征研究对探索寒武系碳酸盐台地边缘建隆含油气性、揭示深层油气成因及油气成藏过程、指导深层油气勘探具有重要意义。

对中下寒武统、中下奥陶统及上奥陶统的 3 套烃源岩何为塔里木盆地塔河油田的主力烃源岩,仍有不少争议^[1~10]。除了较为公认的塔东 2 (TD2)、T904 井原油是来源于中下寒武统烃源岩外,肖中尧^[11]据塔中 62 井志留系原油中的甾萜烷等特征认为是寒武系油藏,又有学者认为塔里木盆地海相原油中广泛存在混源油^[10]。因此,更深入研究仍依赖于盆内烃源岩、油气样品和不同区带热演化史的精细刻划以及高成熟度烃源岩中生标化合物的选择等方面。

目前在全世界 21 个盆地中已发现了 75 个埋深大于 6 000 m 的工业油藏。如美国墨西哥湾第三系碎屑岩中的华盛顿湖油藏埋深 6 540 m,地温高于 200 ℃,地层压力为 130 MPa;另外,澳大利亚学者在太古代砂岩流体包裹体中还发现了液态石油,其源岩的变质程度达葡萄石—绿纤石相(200~300 ℃)。一般认为,在达到 200 ℃ 温度时,石油则转变成焦沥青及甲烷。在较高温度下石油之所以仍能保存,异常高的地层压力可能是其原因之一,高压能延缓有机质的演化,抑制油向气转化^[12]。

1 样品和地质背景

塔深 1 井位于塔里木盆地沙雅隆起阿克库勒凸起东侧的塔河油田 1 区北(图 1)。塔深 1 井在上奥陶统恰尔巴克组、中奥陶统一间房组(O₂y_j)、下奥陶统鹰山组(O₁y_j)、蓬莱坝组和上寒武统下丘里塔格群均见到亮黄色荧光、油迹—油斑等显示。本研究在井深 6 800~7 358 m 采集 2 个中测天然气样,在井深 8 406.4 m(5-14/27)和 8 407.37 m(5-19/27)白云岩溶洞中,经约 30 分钟清水浸泡,并经氯仿溶剂溶解后分别收集到液态烃样约 10 mL,进行

了系统分析。

2 天然气特征

2.1 天然气组分特征

塔深 1 井(6 800~7 358 m)天然气样中以烃类气体为主,约占 97%;非烃气体主要为 CO₂ 及 N₂,仅占 3%。烃类气体中 C₁ 占绝对优势,约占 94%,C₂ 以上烃类仅占 3%左右。

塔深 1 井天然气样的 C₁ 含量为 86.13%,C₂ 以上烃类仅为 2.41%,干燥系数(C₁/∑C_n)为 0.97,属于典型的高演化油型干气。

从天然气 C₅-C₇ 轻烃组成三角图(图 2)可以看出,塔深 1 井天然气 C₅-C₇ 轻烃组成与塔河奥陶系天然气分布相似,具有相同的母质来源。

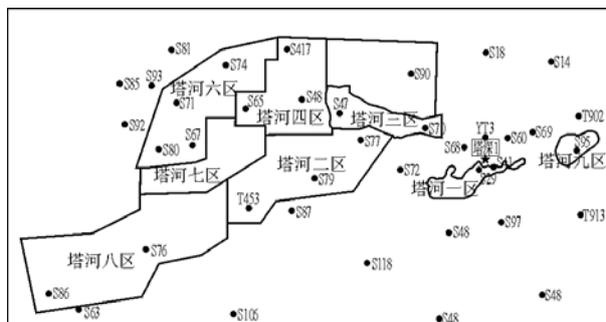


图 1 塔里木盆地塔河油田塔深 1 井位置
Fig.1 Location of the Well Tashen 1 in Tahe oil field, the Tarim Basin

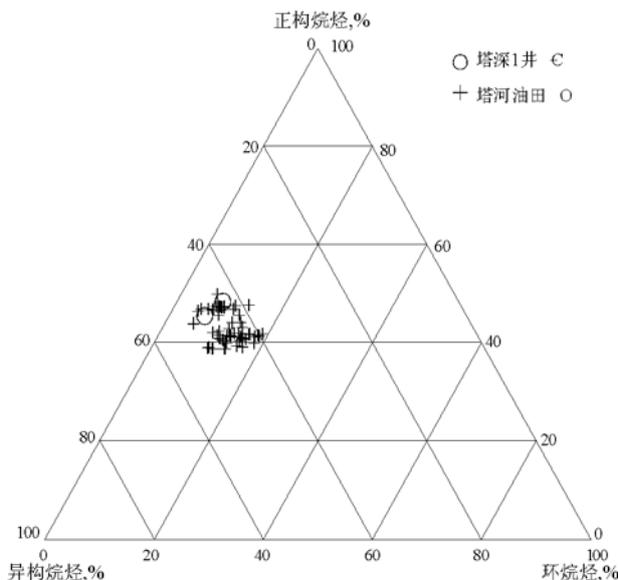


图 2 塔里木盆地塔深 1 井与塔河奥陶系天然气 C₅-C₇ 轻烃组成对比
Fig.2 Contrast of C₅-C₇ light-hydrocarbons in the gases from the Well Tashen 1 and the Ordovician gas in Tahe oilfield, the Tarim Basin

表1 塔里木盆地塔深1井天然气碳、氢同位素分析数据

Table 1 Data of carbon and hydrogen isotopes of the gas in the Well Tashen 1 in the Tarim Basin

样品编号	深度/m	层位	$\delta^{13}\text{C}, \%$					$\delta\text{D}, \%$		
			CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8
R-Q-1	6 800~7 358	Є-O ₁	-38.6	-38.1	-34.5			-153	-155	-112
R-Q-2	6 800~7 358	Є-O ₁	-37.2	-36.7	-33.3	-31.7	-5.3	-157	-153	-114

2.2 天然气碳、氢同位素特征

塔深1井2个天然气样品甲烷碳同位素分别为 -38.6% 和 -37.2% ,平均值 -37.9% (表1)。据沈平等提出的 $\delta^{13}\text{C}_1 \approx 21.721\text{lg}R_0 - 43.3$ 油型气回归方程计算,其对应气源岩 R_0 分别达1.65%和1.91%,为高成熟阶段。 $\delta^{13}\text{C}_2$ 受生气母质类型和成熟度的影响,主要反映母质碳同位素的继承效应。一般将 $\delta^{13}\text{C}_2$ 小于 -28% (或 -29%)作为油型气的重要判识指标之一。由表1可见,塔深1井天然气样的 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值分别为 -34.5% 和 -33.3% ,其 $\delta^{13}\text{C}_2$ 小于 -35% ,属于典型油型气范畴(油型气的 $\delta^{13}\text{C}_3$ 小于 -25.5%),所以,不论从乙烷碳同位素组成,还是丙烷碳同位素组成来看,塔深1井天然气均为典型的油型气。

王飞宇^[13]研究表明,塔里木盆地满加尔坳陷中下寒武统烃源岩镜质体反射率 R_0 在3%以上,中下寒武统烃源岩成熟度相对较低区分布于卡塔克隆起主坳带、沙雅隆起和巴楚隆起的部分地区,其等效镜质体反射率在1.6%~2.0%之间。

塔深1井中2个气样的天然气氢同位素组成分别为 -153% 和 -157% ,分布于海相沉积环境范围内。天然气中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 δD_1 具有一定的正相关关系,即随着热演化程度的增加,碳同位素值逐渐变大,氢同位素值也逐渐增大。塔深1井天然气成熟度高于塔河主体区天然气的成熟度,而低于塔河外围东部和阿克库勒S14和S18井天然气的成熟度。

3 油显示地球化学特征

3.1 饱和烃特征

正构烷烃:塔深1井液态烃样中的正构烷烃分布完整,碳数分布于 C_{13} — C_{38} ,主碳峰 C_{19} — C_{23} ,奇偶优势不明显,2个样品的OEP值均为1.029, $\text{C}_{21-}/\text{C}_{21+}$ 为0.49~1.46。与塔河油田南部盐下S112-1井鹰山组原油相比,塔深1井液态烃样品的重质组分相对较高;同时,其饱和烃色谱基线有不同程度的抬升而形成所谓的“鼓包”,表明它曾遭受过轻微的生物降解作用,在饱和烃生物标志物中也有表现(图3)。

类异戊二烯烃:塔深1井液态烃样品的Pr/Ph为0.762~0.991,与塔河油田绝大多数海相原油相似,具有植烷优势,Pr/Ph比值小于1.0。王铁冠认为属于中下寒武统泥质岩油源的T904井凝析油的植烷优势更突出,Pr/Ph为0.36,为典型咸水环境沉积特征(表2)。总体来看,塔深1井液态烃样与塔河油田奥陶系原油以及T904井鹰山组—桑塔木组(O_{3s})原油具有相似的沉积环境,为典型咸水还原—强还原环境下的海相腐泥型烃源岩。

塔河油田奥陶系原油的Ph/ $n\text{C}_{18}$ 和Pr/ $n\text{C}_{17}$ 比值的相关性非常好,整体反映出原油成熟度的变化。其中,塔河东部和南部原油的成熟度明显高于塔河主体区(4,6,7,8区);而塔河东部的原油成熟度又高于塔河南部。来自中下寒武统的塔东2井原油的Ph/ $n\text{C}_{18}$ 和Pr/ $n\text{C}_{17}$ 分别为0.57和0.39,而塔深1井2个样品分别为0.412,0.441和0.404,0.419,两者均不属于塔河油田奥陶系原油族群,其主要原因可能与其热演化过程不同有关。

规则甾烷:塔河油田奥陶系原油的 C_{29} 甾烷为45%~53%, C_{28} 甾烷为16%~24%, C_{27} 甾烷为23%~37%, C_{27} , C_{28} 与 C_{29} 甾烷相比,所有原油均以 C_{29} 甾烷占优势;而塔深1井液态烃样 C_{29} 甾烷含量48.8%~60.9%,以 C_{29} 甾烷占优势,整体表现为 $\text{C}_{27} > \text{C}_{28} \ll \text{C}_{29}$ 的特点(图4)。因此可推断,塔

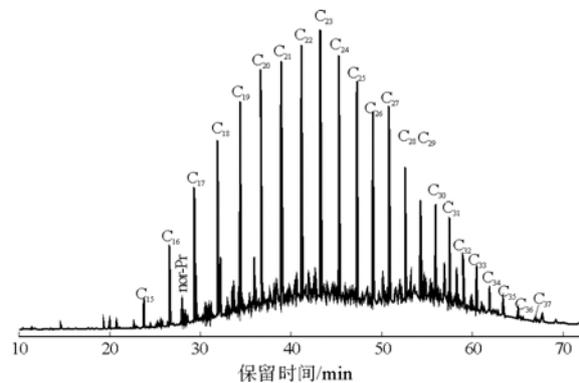


图3 塔里木盆地塔深1井液态烃样饱和烃色谱
Fig. 3 The TIC diagram of the saturated hydrocarbons from the oil in Well Tashen 1, the Tarim Basin

表 2 塔里木盆地塔深 1、塔东 2、T904 井及塔河油田奥陶系原油饱和烃参数

Table 2 Data of the saturated hydrocarbons in the oil samples from Well Tashen 1, Tadong 2, T904 and in the Ordovician oil in Tahe oilfield, the Tarim Basin

井号	层位	深度/m	OEP	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	Pr/Ph
塔深 1	€	8 406.40	1.029	0.412	0.404	0.762
		8 407.37	1.029	0.441	0.419	0.991
塔东 2	O ₁ —€	4 561.90~5 040.00		0.570	0.390	
T904	O _{1y} —O _{3s}	5 637.80~5 939.49				0.360
塔河油田	O _{1y} —O _{2y}		0.92~1.09	0.21~0.49	0.23~0.78	0.50~1.11
			1.01	0.37	0.54	0.72

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

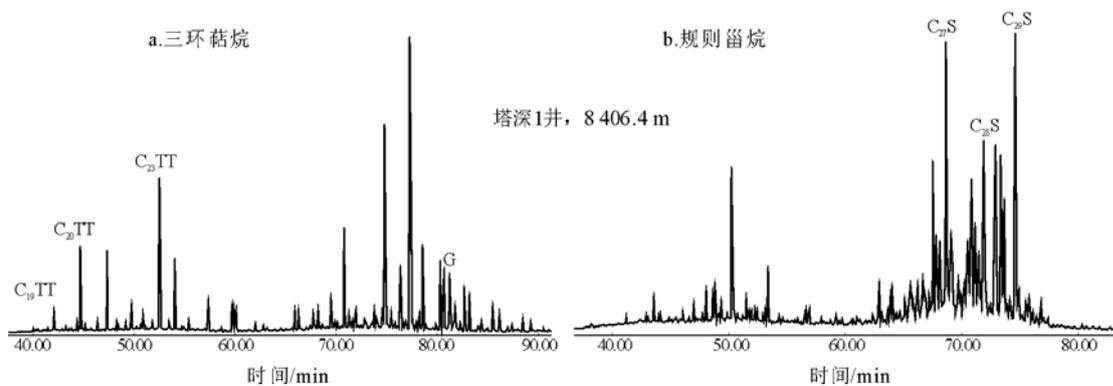


图 4 塔里木盆地塔深 1 井液态烃样中的三环萜烷与规则甾烷分布

Fig. 4 Distributions of tricyclic terpane and regular sterane in saturated hydrocarbons from Well Tashen 1, the Tarim Basin

深 1 井液态烃样与塔河油田奥陶系原油的生烃母质相似,主要以藻类和细菌输入为主,母质类型为腐泥型。

25—降藿烷系列:除饱和烃色谱图基线上存在微弱的“鼓包”现象外,从饱和烃生物标志化合物中均检测出了 C₂₈, C₂₉ 及 C₃₀ [—25—降—17α(H), 21β(H)]藿烷系列化合物,反映出塔深 1 井经历过生物降解的过程。

因此,塔深 1 井上寒武统液态烃样与典型的中下寒武统烃源岩具有高伽马蜡烷、高三芳甲藻甾烷、高甲藻甾烷、高 24—降胆甾烷、高 C₂₈ 规则甾烷、

低重排甾烷含量等特征^[3],二者既有相似性,也有不同的特征。

3.2 芳烃特征

塔河油田奥陶系原油的 MPI₁ 指数为 0.5~0.9, MPI₂ 为 1.0~1.8;塔深 1 井 2 个样品的 MPI₁ 值分别为 1.082 和 1.152, MPI₂ 指数分别为 1.722 和 1.6,表明塔深 1 井液态烃样的热演化过程与塔河油田奥陶系原油完全不同。

3.3 碳同位素

从塔深 1, T904 和塔东 2 井与塔河油田奥陶系原油碳同位素对比(表 3, 图 5)来看,塔深 1 井液

表 3 塔里木盆地塔深 1、塔东 2、T904 井及塔河油田奥陶系原油碳同位素

Table 3 Carbon isotopes of the oil samples from Well Tashen 1, Tadong 2, T904 and the Ordovician oil in Tahe oilfield, the Tarim Basin

井号	δ ¹³ C _{原油} , ‰	δ ¹³ C _{饱和烃} , ‰	δ ¹³ C _{芳烃} , ‰	δ ¹³ C _{非烃} , ‰	δ ¹³ C _{沥青质} , ‰
塔深 1		-29.17	-24.88	-26.47	-26.34
		-29.12	-25.07	-26.14	-25.84
塔东 2	-28.55	-29.30	-28.15	-27.80	-27.40
T904	-29.60	-29.70	-28.70	-28.35	
塔河油田	-31.43~-33.80	-32.89~-30.77	-32.60~-29.40	-32.30~-28.99	-32.97~-30.85
	-32.29	-32.15	-31.89	-31.62	-32.37

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

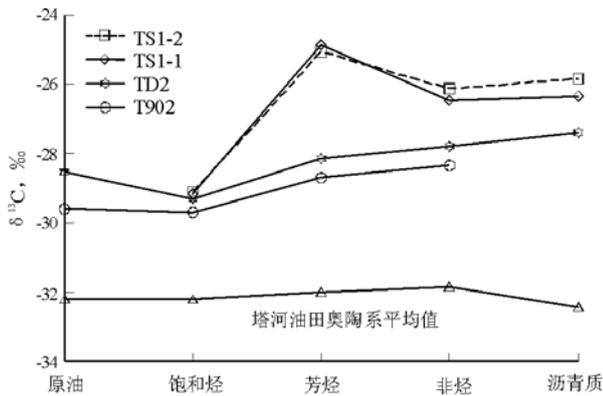


图5 塔里木盆地塔深1、塔东2、T904井及塔河奥陶系原油族组分碳同位素值对比

Fig. 5 Contrast of carbon isotopes of the oils from Well Tashen 1, Tadong 2 and T904 and from the Ordovician oil in the Tarim Basin

态烃样族组分碳同位素最重, $\delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}}$ 为 -29.12% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳烃}}$ 达 -25.07% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{非烃}}$ 为 -26.14% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}}$ 为 -25.84% ; 相比之下, 塔河奥陶系原油全油碳同位素值分布于 -31.43% ~ -33.80% , 平均值 -32.29% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}}$ 为 -32.15% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳烃}}$ 达到 -31.89% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{非烃}}$ 为 -31.62% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}}$ 为 -32.37% , 二者差值达到 3.02% ~ 6.82% , 说明并非同一来源。而塔深1井与塔东2井、T904井 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}}$ 分布于 -29.12% ~ -29.70%) 则相近, 反映出塔深1、塔东2和T904井原油有可能来源于同一源岩, 即中下寒武统烃源岩。

张中宁^[14]研究认为, 寒武—奥陶系海相腐泥型烃源岩可溶有机组分的碳同位素组成一般小于 -28% , 可出现饱和烃 > 芳烃 > 非烃 > 沥青质的完全反序分布现象。而塔深1井液态烃样组分碳同位素未完全反序分布, 它不同于深层高演化烃源岩可溶有机组分的碳同位素特征。

4 结论

1) 塔深1井天然气以烃类气体为主, 约占97%, 干燥系数为0.97; 甲烷的碳同位素平均值为 -37.9% , 对应的气源岩 R_o 分别为1.65%和1.91%, 属于典型高演化油型干气; 天然气轻烃指纹分析认为与塔河天然气具有相似的母质来源。

2) 塔深1井液态烃样正构烷烃分布完整, 碳数分布于 C_{13} — C_{38} 之间, 主碳峰为 C_{19} — C_{23} , 奇偶优势不明显, OEP为1.029, $\text{C}_{21-}/\text{C}_{21+}$ 为0.49~1.46, 属正常原油; 饱和烃色谱基线上存在微弱的“鼓包”, 存在25—降藿烷系列化合物, 反映经历过

弱的生物降解。

3) 塔深1井液态烃样 Pr/Ph 为0.762~0.991 (小于1), 具有植烷优势, 可能为典型咸水还原—强还原环境下的海相腐泥型烃源岩; 液态烃样的 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 和 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 分别为0.412~0.404和0.441~0.419, MPI_1 值为1.082~1.152, MPI_2 指数为1.722~1.6; 其成熟度相对高, 与塔河奥陶系原油的热演化过程不同。

4) 塔深1井液态烃样 C_{29} 甾烷含量为48.8%~60.9%, $\text{C}_{27} > \text{C}_{28} \ll \text{C}_{29}$, 具典型 C_{29} 甾烷优势, 其族组分碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}}$ 为 -29.12% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳烃}}$ 为 -25.07% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{非烃}}$ 为 -26.14% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}}$ 为 -25.84% , 与目前认为来自于中下寒武统烃源岩塔东2、T904井原油有一定的相似性, 初步认为塔深1井液态烃来自于中下寒武统烃源岩。

参考文献:

- 1 赵孟军, 张宝民, 肖中尧等. 塔里木盆地奥陶系偏腐殖型烃源岩的发现[J]. 天然气工业, 1998, 18(5): 32~38
- 2 顾 忆. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 307~312
- 3 张水昌, 张宝民, 王飞宇等. 塔里木盆地两套海相有效烃源层: I 有机质性质、发育环境及控制因素[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 261~267
- 4 王大锐, 宋力生. 论我国海相中上奥陶统烃源岩的形成条件: 以塔里木盆地为例[J]. 石油学报, 2002, 23(1): 31~34
- 5 顾 忆, 黄继文, 邵志兵. 塔河油田奥陶系油气地球化学特征与油气运移[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 746~750
- 6 马安来, 张水昌, 张大江等. 轮南、塔河油田稠油油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 31~38
- 7 王铁冠, 王春江, 何发歧等. 塔河油田奥陶系油藏两期成藏原油充注比率测算方法[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 74~79
- 8 张水昌, 梁狄刚, 张宝民等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. 202~298
- 9 赵宗举, 周新源, 郑兴平等. 塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 10~15
- 10 罗宪婴, 赵宗举, 孟元林. 正构烷烃奇偶优势在油源对比中应用: 以塔里木盆地地下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 74~77
- 11 肖中尧, 卢玉红, 桑 红等. 一个典型的寒武系油藏: 塔里木盆地塔中62井油藏成因分析[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 155~160
- 12 郝 芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79~84
- 13 王飞宇, 张水昌, 张宝民等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 461~467
- 14 张中宁, 刘文汇, 郑建京等. 塔里木盆地深层烃源岩可溶有机组分的碳同位素组成特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 769~773