

# 塔河油田西北部于奇西 1 井 奥陶系中—轻质原油地化特征及成因探讨

罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 刘永立

(中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 于奇西 1(YQX1) 井在塔河油田西北部奥陶系超重质油区获稳产中—轻质油流, 为了确定其原油成因, 作者通过与邻区奥陶系超重质油、雅克拉凝析油的物性、族组成、饱和烃、芳烃色谱—质谱等地球化学特征对比, 发现 YQX1 井原油具有高饱和烃、中等芳烃、低非烃和沥青质的特征, 正构烷烃系列分布完整, 呈单峰前峰型分布, 色谱图上出现较强的“UCM”鼓包。甾萜烷分布与于奇西超重质油以及雅克拉凝析油具有相似性, 确定其同源; 而  $T_s/(T_s+T_m)$ 、4-/1-MDBT 等成熟度参数对比显示, YQX1 井原油成熟度较邻区超重质油藏高, 而和雅克拉凝析油相近, 属高成熟原油。结合塔河西北部晚期的油气成藏背景和构造演化特征, 尤其是轮台断裂在喜马拉雅期的控油作用, 推断 YQX1 井中—轻质油主要来自北部。喜马拉雅晚期的高成熟轻质油气沿轮台断裂运移, 至奥陶系顶部不整合面由北向南对前期的超重质油藏进行混合改造, 形成了一定范围的中—轻质油藏。

**关键词:** 生物标志物; 地球化学特征; 成藏模式; 于奇西 1 井; 奥陶系; 塔河油田

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Geochemical characteristics and genetic analysis of Ordovician medium-light oils from well YQX1 in the northwest of Tahe Oil Field

Luo Mingxia, Xia Yongtao, Shao Xiaoming, Liu Yongli

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** Medium-light oils were tested in well YQX1 in the Ordovician super heavy oil area in the northwest of Tahe Oil Field. We studied their geochemical characteristics including physical character, group composition, GC-MS of saturated and aromatic hydrocarbons, and made a comparison with the Ordovician super heavy oils in the Yuqi area and the condensate oils in the Yakela area, in order to confirm their genetic types. The medium-light oils from well YQX1 have a high saturate hydrocarbon content, medium aromatic hydrocarbon content, and low non-hydrocarbon and asphaltene contents. The *n*-alkane series is complete with a single mode. An obvious “UCM” hump appears in chromatogram. The distributions of steranes and terpanes has a good correlation with the super heavy oils of Yuqi area and the condensate oils of Yakela area, which indicates that they have the same source. Maturity parameters such as  $T_s/(T_s+T_m)$  and 4-/1-MDBT show that oils from well YQX1 have a high maturity, which is similar to the condensate oils in Yakela and higher than the super heavy oils of the Yuqi area. Combined with terminal accumulation background and tectonic evolution in the northwest of Tahe Oil Field, it is inferred that the oils from well YQX1 mainly came from the north. The high-maturity light oil and gas migrated along the Luntai fault during the Himalayan period, transformed the early heavy oil reservoirs along unconformity from north to south, and finally formed the medium-light oil currently present in the reservoir.

**Key words:** biomarker; geochemical characteristics; accumulation model; well YQX1; Ordovician; Tahe Oil Field

塔河油田西北部处于塔里木盆地沙雅隆起阿克库勒凸起的西北翼, 北依轮台断裂, 西临哈拉哈塘凹陷。自 2007 年艾丁 4 井突破以来, 已累计提交探明石油地质储量  $5.3 \times 10^8$  t, 形成了  $200 \times 10^4$  t 的超重质油产能基地, 显示了该区奥陶系巨大的油

气勘探潜力。

前人对塔河油田奥陶系的成藏进行了大量研究, 认为塔河油田奥陶系经历了多期油气充注与成藏, 主要存在 3 个成藏期: 加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅期<sup>[1-4]</sup>。受不同期次和不同

方向的油气充注改造影响,奥陶系油气藏自北西南东在平面上呈现超重质油藏→重质油藏→中质油藏→轻质油藏→挥发性油藏→气藏的环带状分布(图1)。塔河油田西北部在加里东中晚期处于构造高部位,以加里东晚期—海西早期大规模油气充注为主,并遭受了强烈的水洗氧化和生物降解作用,而海西早期后持续沉降,整体为残留保存下来的超重质油藏,后期油气充注较弱<sup>[5-7]</sup>。

2014年,为进一步扩大超重质油藏而部署的于奇西1(YQX1)井在奥陶系中—下统顶部获得稳产中—轻质油流,打破了塔河西北部超重质油的资源格局,开拓了中—轻质油藏勘探的新领域。前期的认识难以解释YQX1井中—轻质油藏的存在,因此本文旨在通过YQX1井与邻区奥陶系超重质油、

雅克拉凝析油的地球化学特征对比,探讨YQX1井中—轻质油藏的成因和成藏模式,从而为塔河西北部奥陶系中—轻质油藏的勘探提供理论依据。

### 1 原油物性及族组成

YQX1井的原油密度变化较大,分布在0.836 3~0.881 3 kg/L,总体为低凝固点、低黏度、低硫、高蜡的中质—轻质原油(表1)。而于奇西地区奥陶系原油物性总体和YQ5、YQ9及DUH2井相似,原油密度均在1.0 kg/L以上,属高凝固点、高黏度、高硫、高蜡的超重质原油。雅克拉地区原油密度多在0.80 kg/L左右,属低凝固点、低黏度、低硫、高蜡的凝析油。

从原油族组成看,雅克拉地区的原油饱和烃含

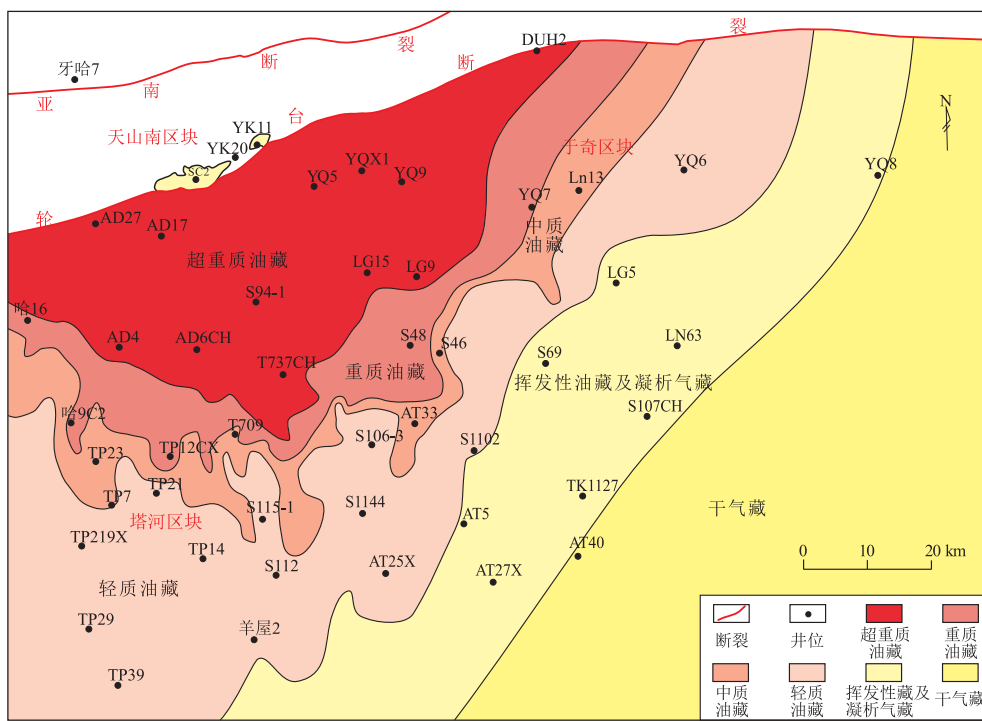


图1 塔河油田奥陶系油气藏类型分布

Fig.1 Distribution of Ordovician reservoir types in the Tahe Oil Field

表1 塔河油田YQX1井和于奇西、雅克拉地区原油物性对比

Table 1 Physical characteristics of oils from well YQX1, western Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

区块	井号	深度/m	层位	密度(20 °C)/ (kg · L <sup>-1</sup> )	运动黏度/ (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	含蜡量/ %	含硫量/ %	凝固点/ °C	原油类型
于奇西	YQ5	5 938~6 040	O <sub>1-2</sub> y	1.034 7		3.62		>50	黑色超重油
	YQ9	5 721~5 760	O <sub>1-2</sub> y	1.038 5		2.87	3.12	>50	黑色超重油
	DUH2	5 774~5 840	O <sub>1-2</sub> y	1.031 9	55 831.7	7.78	2.60	>50	黑色超重油
	YQX1	5 773.52~5 850	O <sub>1-2</sub> y	0.863 0	12.27	4.08	0.42	<-34	黑色轻质油
	YQX1	5 773.52~5 850	O <sub>1-2</sub> y	0.881 3	74.45	2.62	0.53	-8	黑色中质油
	YQX1	5 773.52~5 850	O <sub>1-2</sub> y	0.836 3	13.82	4.44	0.39	<-34	黑色轻质油
雅克拉	YK11	5 426.85~5 431	Z	0.808 4	2.05	1.73	0.11	-13	淡黄色凝析油
	YK20	5 325.5~5 339	K <sub>1</sub> y	0.796 5	2.05	2.66	0.04	-2	淡黄色凝析油

表 2 塔河油田 YQX1 井和于奇西、雅克拉地区原油族组成  
Table 2 Group composition of oils from well YQX1, the western Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

井号	深度/m	层位	族组成/%						饱芳比
			饱和烃	芳烃	总烃	非烃	沥青质	非烃+沥青质	
YQ5	5 938~6 040	O <sub>1-2</sub> Y	21.39	22.38	43.77	8.90	47.33	56.23	0.96
YQ9	5 721~5 760	O <sub>1-2</sub> Y	18.33	28.79	47.12	9.85	43.03	52.88	0.64
DUH2	5 774~5 840	O <sub>1-2</sub> Y	33.69	27.75	61.44	7.64	30.92	38.56	1.21
YQX1	5 773.52~5 850	O <sub>1-2</sub> Y	62.92	24.90	87.82	7.41	4.77	12.18	2.53
YK11	5 426.85~5 431	Z	86.63	8.32	94.95	3.57	1.49	5.06	10.41
YK20	5 325.5~5 339	K <sub>1</sub> Y	88.87	9.87	98.71	1.26		1.26	9.0

注:测试分析单位为中国石化石勘院无锡石油地质研究所,之后的地化分析结果和族组分分析均来自该测试分析单位。

量最高,具有高饱和烃、低芳烃、低非烃和沥青质的特征,饱芳比达到 9.0~10.41。YQX1 井的饱和烃含量次之,为 62.92%,芳烃含量中等(24.9%),饱芳比较高,为 2.53(表 2)。而于奇西奥陶系超重质油的饱和烃含量低(<35%),非烃和沥青质含量高(40%~60%),饱芳比平均低于 1.0。族组分的这种差异表明相比于奇西奥陶系超重质油, YQX1 井、雅克拉地区原油的演化程度高、保存相对较好。

## 2 饱和烃色谱特征

从饱和烃色谱图上看(图 2), YQX1 井中一轻质油及雅克拉凝析油的正构烷烃系列分布完整,碳数分布范围在  $nC_{11}-nC_{36}$ ,呈单峰前峰型分布,主峰碳在  $nC_{14}$ 、 $nC_{16}$ ,显示低碳数的正构烷烃含量较高。原油无明显的奇偶碳优势,轻重比( $\sum C_{21-}/\sum C_{22+}$ ) YK11 井较低,为 2.42, YQX1 井及 YK20 井较高,分别为 4.76、6.13。于奇西奥陶系超重质油的正构烷

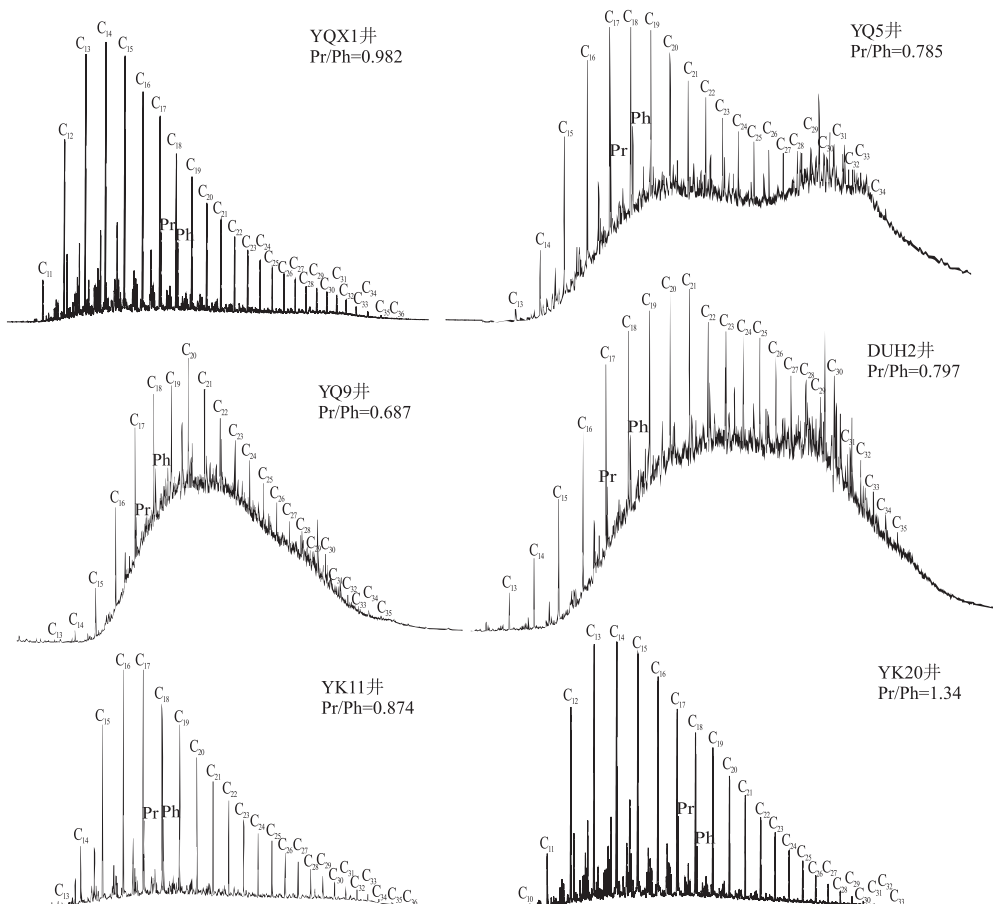


图 2 塔河油田于奇及雅克拉地区饱和烃色谱

Fig.2 Chromatograms (TIC) of saturated hydrocarbons from Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

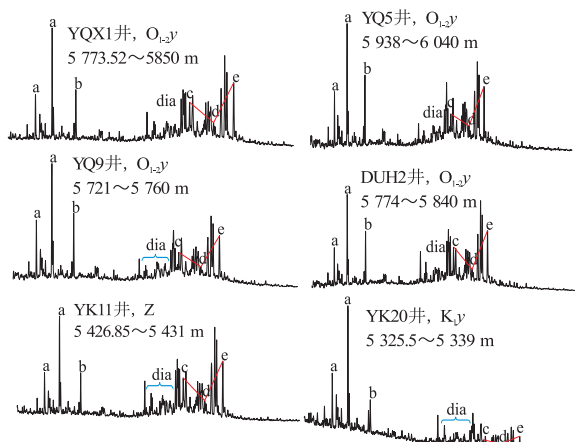
烃分布型式整体和 YQX1 井、雅克拉地区相似,主峰碳略偏后一些,在  $nC_{17} \sim nC_{19}$ ,  $\sum C_{21-} / \sum C_{22+}$  值分布在 1.19~2.08, 低于 YQX1 井及雅克拉地区, 表明其成熟度相对较低。姥鲛烷与植烷的比值 Pr/Ph 分布在 0.687~1.34, 反映其母质的沉积环境具有较强的还原性。

YQX1 井中—轻质油、雅克拉凝析油、于奇西超重质油的色谱基线均呈现不同程度的“UCM”鼓包(图 2), 表明研究区原油都遭受过氧化和降解等次生改造作用。其中, YQ5、YQ9、DUH2 井稠油的色谱基线“UCM”鼓包明显较高, 表明经历了强烈的氧化降解作用, YQX1 井中—轻质油、雅克拉凝析油的饱和烃基线相对平稳, 氧化降解较弱。

### 3 原油生物标志物特征

#### 3.1 甾烷系列化合物

YQX1 井中—轻质油、雅克拉凝析油以及于奇西奥陶系超重质油的甾烷分布特征基本一致。低分子量的孕甾烷和升孕甾烷丰度高, 重排甾烷含量较低,  $C_{27} - C_{28} - C_{29}$  规则甾烷呈现  $C_{27} > C_{28} \ll C_{29}$  的不对称“V”字型分布(图 3)。甾烷中  $C_{27} - C_{28} - C_{29}$  规则甾烷的相对组成可以很好地反映原油的母质类型<sup>[8-9]</sup>。YQX1 井奥陶系原油的  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾烷的含量分别为 30.29%、14.68% 和 55.03%, 和于奇



a. 孕甾烷; b. 升孕甾烷; c.  $C_{27}$ 规则甾烷; d.  $C_{28}$ 规则甾烷; e.  $C_{29}$ 规则甾烷; dia. 重排甾烷

图3 塔河油田于奇及雅克拉地区原油  $m/z$  217 质量色谱

Fig.3 Mass chromatograms ( $m/z$  217) of oils in Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

西奥陶系超重质油、雅克拉凝析油以及塔河主体区奥陶系正常原油(S46、S48)的甾烷分布特征一致(图 3), 证实于 YQX1 井奥陶系的中—轻质油和塔河奥陶系正常油—超重质油、雅克拉地区凝析油同源, 均来自下古生界海相腐泥型母质。

#### 3.2 萜烷系列化合物

YQX1 井中—轻质油与雅克拉凝析油、于奇西奥陶系稠油的萜烷系列同样具有很好的相似性(图 4)。原油中含有丰富的三环萜烷和藿烷系列。

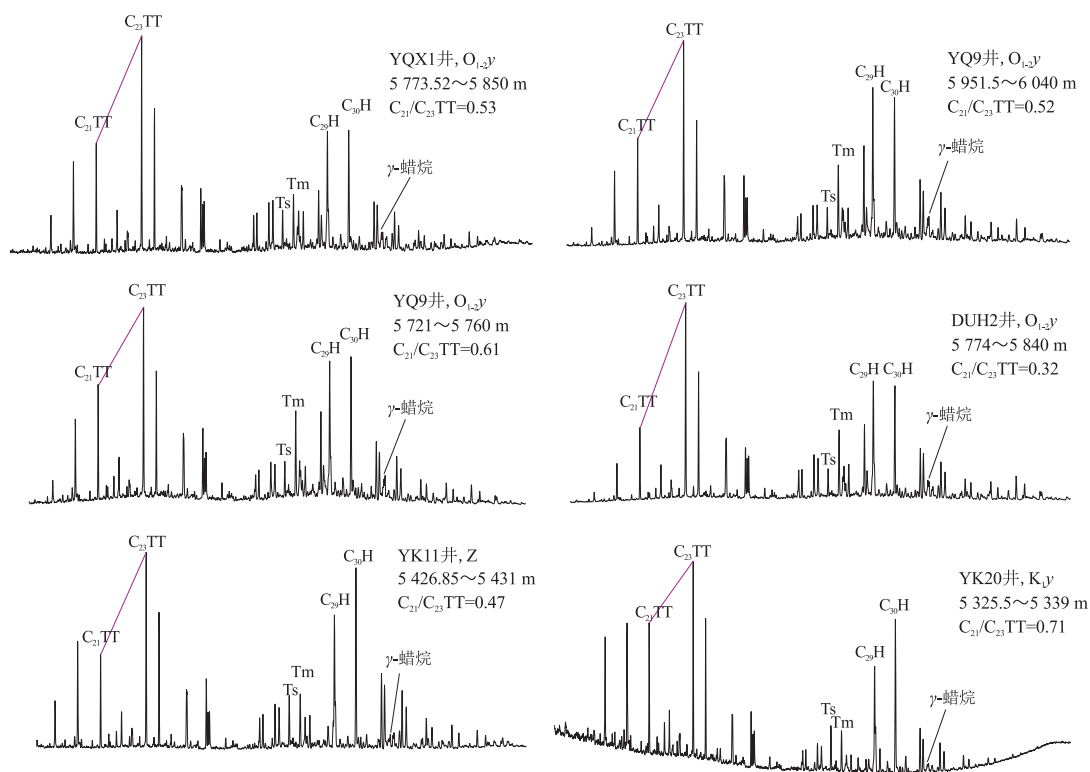


图4 塔河油田于奇及雅克拉地区原油  $m/z$  191 质量色谱

Fig.4 Mass chromatograms ( $m/z$  191) of oils in Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

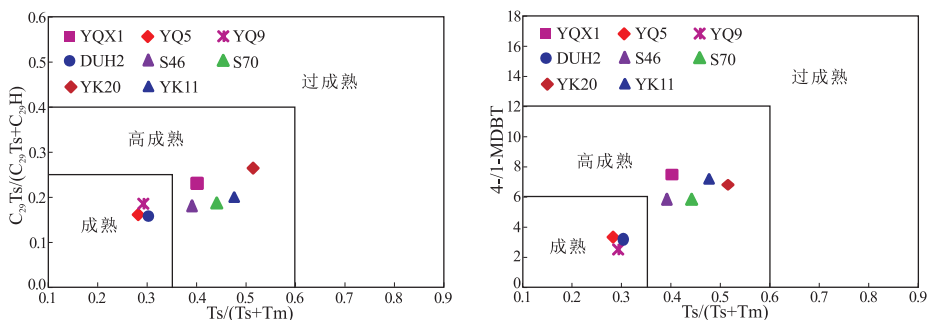


图 5 塔河油田 YQX1 井与于奇、雅克拉和塔河主体原油成熟度参数关系

Fig.5 Maturities of oils from well YQX1, Yuqi, Yakela and Tahe main block, Tahe Oil Field

表 3 塔河油田于奇及雅克拉地区原油生物降解程度对比

Table 3 Extent of biodegradation of oils in Yuqi and Yakela area, Tahe Oil Field

井号	C <sub>28</sub> -25-降藿烷/ C <sub>29</sub> 藿烷	C <sub>29</sub> -25-降藿烷/ C <sub>30</sub> 藿烷
YQ5	2.17	0.55
YQ9	2.80	0.49
DHU2	1.49	0.51
YQX1	1.32	0.43
YK11	0.15	0.04
YK20	0.58	0.08

三环萜烷以 C<sub>23</sub> 为主峰, 呈现出 C<sub>21</sub>TT/C<sub>23</sub>TT 值小于 1.0 的特征, 与塔河主体奥陶系原油具有很好的可比性<sup>[10-12]</sup>, 均为典型的海相原油。藿烷中 C<sub>29</sub>、C<sub>30</sub>藿烷优势明显, γ-蜡烷含量相对较低, 表明原油主要来自较高盐度沉积环境下的细菌等母质。相对于奇西地区的稠油, YQX1 井的成熟度较高, Ts/(Ts+Tm) 比值为 0.40, 与塔河主体及雅克拉地区的原油成熟度相近, 属高成熟油, 而于奇西奥陶系稠油则属成熟油(图 5)。

而在原油 m/z177 质量色谱图上, 于奇及雅克拉地区的 6 口井均检测出了 25-降藿烷系列, 证实研究区原油均遭受了严重的生物降解。利用 25-降藿烷系列化合物与原始藿烷系列化合物的比值, 可以定量反映原油遭受氧化降解的强度<sup>[5,13-14]</sup>。从 C<sub>28</sub>-25-降藿烷/C<sub>29</sub>藿烷与 C<sub>29</sub>-25-降藿烷/C<sub>30</sub>藿烷的比值看, 总体上于奇西稠油的降解程度最高, YQX1 井次之, 雅克拉凝析油最低(表 3), 这与饱和烃色谱图上基线鼓包的幅度基本相符。

### 3.3 芳烃组成

YQX1 井中—轻质油、雅克拉凝析油以及于奇西地区稠油的芳烃化合物组成均以萘、菲、芴系列为主, 其他化合物含量相对较低。在三芴系列组成中, 以高硫芴、低氧芴为特征, 呈现海相咸水强还原

环境的沉积特征。

1984 年 Hughes 提出, 硫芴系列中 4-甲基二苯并噻吩/1-甲基二苯并噻吩(4-/1-MDBT) 可作为有效的成熟度指标<sup>[15]</sup>。YQX1 井奥陶系原油的 4-/1-MDBT 为 7.51, 相比于奇西地区奥陶系稠油要高, 同样落在了高成熟油的范畴, 与 Ts/(Ts+Tm) 的分布特征一致(图 5)。

## 4 YQX1 井中—轻质油气成因探讨

通过上述原油地球化学特征对比, YQX1 井中—轻质原油与于奇西超重质油、雅克拉凝析油同源, 均来自下古生界海相腐泥型母质。再结合周边的区域地质背景, 认为 YQX1 井中—轻质油藏的形成与轮台断裂和现今的构造形态密切相关。

轮台断裂为喜马拉雅期油气运移的主要通道, 控制了一系列海相油气田的分布<sup>[16-17]</sup>, 如红旗 1 号油气田、东河塘油气田和雅克拉凝析气田等。喜马拉雅期, 轮台断裂处于拉张应力背景, 开启程度较大, 是油气运移的有利通道。受前期构造挤压作用影响, 轮台断裂下盘奥陶系地层的产状多为南倾, 因此海相轻质油气主要沿轮台断裂向上盘运移, 在圈闭条件较好的古潜山部位聚集成藏。而轮台断裂下盘的塔河油田西北部奥陶系主要为加里东晚期—海西早期形成的超重质油藏。

根据实钻井情况, 轮台断裂东段 YQX1 井及其北部的奥陶系为北倾构造形态, 为油气向南调整提供了有利条件。高成熟的轻质油气沿轮台断裂向上运移, 至奥陶系沿不整合面自北向南进行运移调整, 对前期形成的超重质油藏进行混合改造, 在一定范围内形成了一定规模的中—轻质油藏, 如 YQX1 井中—轻质油藏(图 6)。

## 5 结论

(1) YQX1 井奥陶系原油属中—轻质油, 具有高

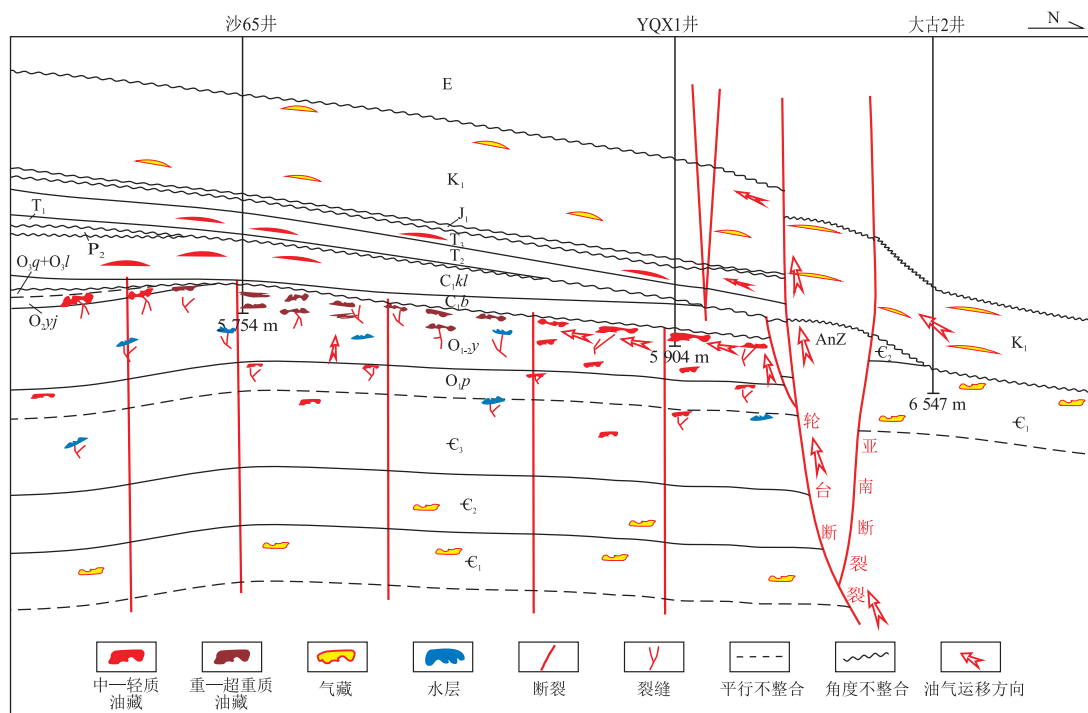


图6 塔河油田 YQX1 井中—轻质油藏成藏模式

Fig.6 Accumulation model of medium-light oils from well YQX1, Tahe Oil Field

饱和烃、低芳烃、低非烃和沥青质的特征,与雅克拉凝析油相似,而和于奇西奥陶系稠油具有明显差异。

(2)YQX1 井中—轻质原油与雅克拉凝析油、于奇西奥陶系稠油具有相似的地球化学特征,均来自海相腐泥型母质。Ts/(Ts+Tm)、4-/1-MDBT 值表明其成熟度较高,总体和塔河主体奥陶系及雅克拉地区原油相近,属高成熟原油,成熟度高于于奇西地区稠油。

(3)YQX1 井中—轻质油表现出正构烷烃系列完整与“UCM”鼓包、25-降藿烷并存的特征,表明该井至少经历了2期油气充注与成藏。

(4)结合该区的构造演化,初步认为 YQX1 井的中—轻质油为喜马拉雅期的高成熟轻质油气沿轮台断裂缝垂向运移,至奥陶系不整合面自北向南对早期的超重质油藏进行调整改造形成的。

参考文献:

[1] 饶丹,秦建中,许锦,等.塔河油田奥陶系油藏成藏期次研究[J].石油实验地质,2014,36(1):83-88,101.  
Rao Dan, Qin Jianzhong, Xu Jin, et al. Accumulation periods of Ordovician reservoirs in Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 83-88, 101.

[2] 高波,刘文汇,范明,等.塔河油田成藏期次的地球化学示踪研究[J].石油实验地质,2006,28(3):276-280.  
Gao Bo, Liu Wenhui, Fan Ming, et al. Study on geochemical tracking for the periods of reservoir-forming of oil and gas in the Tahe Oilfield[J].

Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 276-280.

[3] 陈红汉,李纯泉,张希明,等.运用流体包裹体确定塔河油田油气成藏期次及主成藏期[J].地质前缘,2003,10(1):190.  
Chen Honghan, Li Chunquan, Zhang Ximing, et al. Determine accumulation period and the main reservoir in Tahe Oilfield by using fluid inclusions[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 190.

[4] 丁勇,晏银华,顾忆,等.塔里木盆地塔河油田成藏史与成藏机制[J].新疆石油地质,2001,22(6):478-479.  
Ding Yong, Yan Yinhua, Gu Yi, et al. The reservoir-formed history and mechanism of Tahe Oilfield in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(6): 478-479.

[5] 王传刚,王铁冠,张卫彪,等.塔里木盆地北部塔河油田原油分子地球化学特征及成因类型划分[J].沉积学报,2006,24(6):901-909.  
Wang Chuangang, Wang Tieguan, Zhang Weibiao, et al. Molecular geochemistry and classifications of genetic types of petroleum from Tahe Oilfield of the northern Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 901-909.

[6] 顾忆.塔里木盆地北部塔河油田油气成藏机制[J].石油实验地质,2000,22(4):307-312.  
Gu Yi. Forming mechanism of hydrocarbon pools in Tahe Oilfield of the northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2000, 22(4): 307-312.

[7] 丁勇,彭守涛,李会军.塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J].石油实验地质,2011,33(5):488-494.  
Ding Yong, Peng Shoutao, Li Huijun. Features and main controlling factors of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield and northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 488-494.

[8] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. Upper

Saddle River; Prentice Hall Inc, 1993: 1-137.

[9] 林壬子,张敏.油藏地球化学进展[M].西安:陕西科学技术出版社,1996:110-123.

Lin Renzi, Zhang Min. Advances in reservoir geochemistry [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1996: 110-123.

[10] 郑朝阳,段毅,张学军,等.塔河油田奥陶系原油有机地球化学特征及其油藏成因[J].沉积学报,2011,29(3):605-612.

Zheng Chaoyang, Duan Yi, Zhang Xuejun, et al. Characteristics of molecular geochemistry and genesis of crude oils from Tahe Oilfield of Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 605-612.

[11] 张斌,崔洁,顾乔元,等.塔北隆起西部复式油气区原油成因与成藏意义[J].石油学报,2010,31(1):55-60,67.

Zhang Bin, Cui Jie, Gu Qiaoyuan, et al. Oil origin classification in composite hydrocarbon accumulation play in the western Tabei Uplift and its geological significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 55-60, 67.

[12] 崔景伟,王铁冠,李美俊,等.塔河油田白垩系原油地化特征与成因类型[J].中国矿业大学学报,2011,40(3):430-437.

Cui Jingwei, Wang Tieguan, Li Meijun, et al. Geochemical characteristics and genetic types of Cretaceous oils, Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 430-437.

[13] 倪春华.25-降萘烷系列化合物及其在油藏地球化学研究中

的应用[J].江苏地质,2008,32(1):50-54.

Ni Chunhua. 25-norhopanoids compounds and application in reservoir geochemistry study [J]. Jiangsu Geology, 2008, 32(1): 50-54.

[14] 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.

[15] Hughes W B. Use of thiophenic organosulfur compounds in characterizing crude oils derived from carbonate versus siliclastic sources [M] // Palacas J B, ed. Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks, AAPG studies in geology. Oklahoma: AAPG Press, 1984, 18: 181-196.

[16] 李洪波,王铁冠,李美俊.塔北隆起雅克拉凝析油气田油气充注途径示踪[J].石油学报,2013,34(2):219-224.

Li Hongbo, Wang Tieguan, Li Meijun. Tracing study on oil-gas filling pathways of Yakela gas condensate field in Tabei Uplift [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 219-224.

[17] 何海泉,康志宏.沙雅—轮台断裂与油气[J].石油实验地质,1992,14(1):40-45.

He Haiquan, Kang Zhihong. The relationship between the Shaya-Luntai Faulting system and oil/gas occurrence [J]. Experimental Petroleum Geology, 1992, 14(1): 40-45.

(编辑 黄娟)

(上接第 243 页)

[18] 李志明,郑伦举,马中良,等.烃源岩有限空间油气生排模拟及其意义[J].石油实验地质,2011,33(5):447-451,459.

Li Zhiming, Zheng Lunju, Ma Zhongliang, et al. Simulation of source rock for hydrocarbon generation and expulsion in finite space and its significance [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 447-451, 459.

[19] 郑伦举,马中良,王强,等.烃源岩有限空间热解生油气潜力定量评价研究[J].石油实验地质,2011,33(5):452-459.

Zheng Lunju, Ma Zhongliang, Wang Qiang, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon yielding potential of source rock: Application of pyrolysis in finite space [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 452-459.

[20] 刘全有,刘文汇,孟仟祥.热模拟实验中煤岩及壳质组饱和烃萘类系列化合物地球化学特征[J].沉积学报,2006,24(6):917-922.

Liu Quanyou, Liu Wenhui, Meng Qianxiang. Organic geochemis-

try of terpanes in saturated hydrocarbons from coal and exinite in pyrolysis under closed system [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 917-922.

[21] Xie Xiaomin, Volkman J K, Qin Jianzhong, et al. Petrology and hydrocarbon potential of microalgal and macroalgal dominated oil shales from the Eocene Huadian Formation, NE China [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 124: 36-47.

[22] Zhao Pinwen, Zhao Yujuan, Zou Changjun, et al. Study on ultrasonic extraction of kerogen from Huadian oil shale by solvents [J]. Oil Shale, 2013, 30(4): 491-500.

[23] Li Qingyou, Han Xiangxin, Liu Qingqing, et al. Thermal decomposition of Huadian oil shale. Part I. Critical organic intermediates [J]. Fuel, 2014, 121: 109-116.

[24] Van Kaam-Peters H M E, köster J, De Leeuw J W et al. Occurrence of two novel benzothiophene hopanoid families in sediments [J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(7): 607-616.

(编辑 韩 彧)