

文章编号:1000-0550(2004)增刊-0066-07

塔里木盆地塔东 2 井原油成因分析

肖中尧¹ 黄光辉² 卢玉红¹ 张秋茶¹ 吴 懿¹

1(中国石油塔里木油田分公司 新疆库尔勒 841000)

2(长江大学地球科学学院 湖北荆州 434102)

摘 要 塔东 2 井原油为高密度、粘度大, $\delta^{13}\text{C}$ 相对较重的稠油。原油中轻烃、环状萜类、甾烷及芳香甾烷组成与分布均具有海相原油的特点。具有时代意义生物标志物的油源对比结果表明, 该原油来源于寒武系生源岩, 具有自生自储特点。高反射率热解沥青的存在、芳烃馏分中高含量的多元稠环芳烃及正构烷烃碳同位素相对较重的特点, 表明原油在成藏后经历了短期高温热事件的影响。

关键词 海相原油 寒武系 稠环芳烃 高温热事件 塔里木盆地

第一作者简介 肖中尧 男 1969 年出生 高级工程师 有机地球化学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

塔里木盆地塔东低凸起是一受车尔臣断裂控制的向南不断抬升的古隆起。在车尔臣断裂下盘的隆起带内发育一系列与断裂走向基本一致的局部构造。塔东 2 井位于这一构造带的塔东 2 号构造上。完井测试表明, 在寒武系地层中存在高密度的黑油资源。和塔里木盆地台盆区其它原油比较, 该原油具有高密度(比重为 1.0217 g/cm^3)、高粘度($2698\text{ mPa}\cdot\text{s}$)、中等含蜡量(10.46%)、低总烃含量(46.82%)、高“非烃+沥青质”(45.92%)和低的饱芳比(1.06)的特点。对其成因的分析, 无疑对塔里木盆地的油气勘探和台盆区原油成藏理论的研究具有重要的实际意义。

1 样品与实验

原油样品采自塔东 2 井 4561.93~5040.00 m 寒武系。在进行原油油顶气分析后, 索分出部分样品进行全油碳稳定同位素分析。取一定量的原油进行族组份分析。对饱和烃馏分进行色谱(GC)、色谱/质谱(GC/MS)分析; 芳烃馏分进行 GC/MS 分析。

色谱/质谱分析条件: 色谱仪: HP-6890; 质谱仪: MSD-5973; 色谱柱为 HP-5MS 弹性石英毛细柱, 柱长 30 m, 内径 0.25 mm, 膜厚 0.25 μm 。饱和烃色谱分析条件: 50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 2 min, 后以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 310 $^{\circ}\text{C}$, 310 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 25 min。芳烃馏色谱分析条件: 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 2 min, 后以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 150 $^{\circ}\text{C}$, 然后再以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 320 $^{\circ}\text{C}$, 320 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 15 min。载气为氦气, 流速为 1 ml/min。质谱条件: 进样器温度为 300 $^{\circ}\text{C}$, 电离能量 70 eV, 扫描范围 50~550, 进样方式为脉冲不分流。

收稿日期: 2003-10-20

2 原油化学组成

2.1 原油轻烃馏份组成

原油的形成过程始终伴随着轻烃的形成过程^[1], 也就是说, 原油中的轻烃馏分可以从另一角度表征原油的某些成因特征。不管是根据 Thompson 的轻烃成因理论还是 Mango 的热稳态催化理论^[2,3], 塔东 2 井原油轻烃组成均表现出成熟海相原油的分布特征(图 1)。具体表现为: ①苯及甲苯含量极低, 苯、甲苯与正庚烷($n\text{C}_7$)的比值均为 0.04; ②甲基环己烷/二甲基环戊烷(2.45)值 < 3、环己烷/甲基环戊烷值(1.50) < 2, 均落入海相原油分布范围; ③在 C_7 轻烃组成中, $n\text{C}_7$ 占 29.76%, $i\text{C}_7$ 占 33.08%, 环烷烃(甲基环己烷+二甲基环戊烷)占 35.89%, 甲苯仅占 1.27%。其中, P2(2-甲基己烷+3-甲基己烷)为 25.44%, P3/N2((3-乙基戊烷+二甲基戊烷+2,2,3-三甲基己烷)/1,1-+1,3-二甲基环戊烷)为 2.05。甲基环己烷指数为 21.23%。上述特征均表现为海相原油或 I 型母质成因原油的分布特点。

2.2 饱和烃馏分组成

2.2.1 正构烷烃组成

塔东 2 井原油色谱中正构烷烃呈单峰型, 以低碳数化合物为主, 这与正常成因的高密度原油中高碳数正构烷烃含量较高的特征是不一致的。Pr/Ph 为 1.47, Pr/ $n\text{C}_{17}$ 和 Ph/ $n\text{C}_{18}$ 较高, 分别为 0.50 和 0.39 (图 2)。值得提出的是, 在 $n\text{C}_{15}\sim n\text{C}_{18}$ 和 $n\text{C}_{25}\sim n\text{C}_{30}$ 范围内色谱图基线存在较明显的“鼓包”, 表明原油可

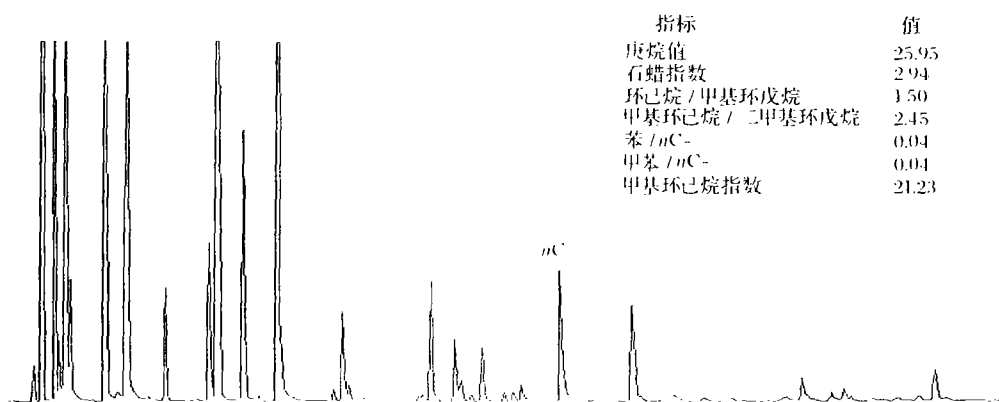


图1 塔东2井4 561.93~5 040.00 m原油轻烃馏分组成特征

Fig.1 Characteristics of light hydrocarbon fractionation composition in crude oil from 4 561.93~5 040.00 m in Well Tadong 2

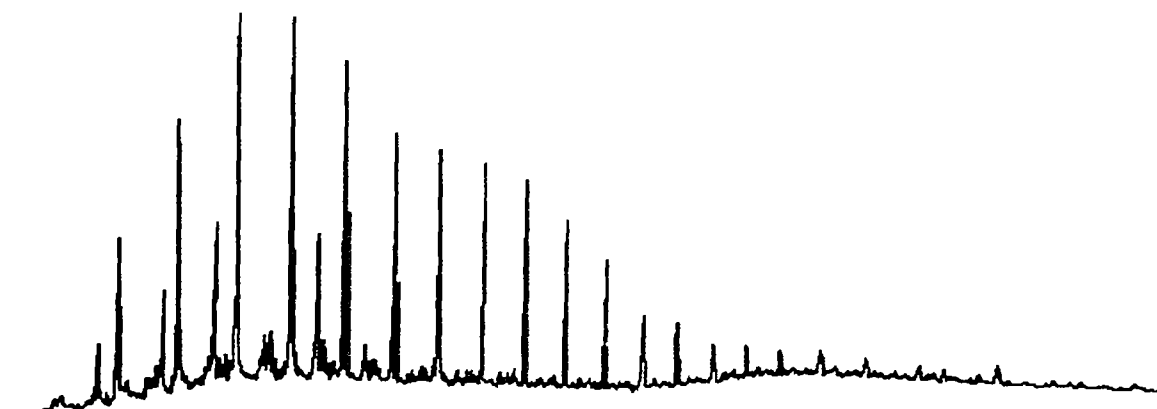


图2 塔东2井4 561.93~5 040.00 m原油正构烷烃组成特征

Fig.2 Characteristics of *n*-alkane composition of crude oil from 4 561.93~5 040.00m in Well Tadong 2

能存在一定的降解作用。

2.2.2 甾萜类组成

① 在 $m/z191$ 质量色谱图上,三环萜烷以 C_{23} 化合物为主峰, C_{24} -四环萜烷丰度低,五环三萜烷中 T_s 含量小于 T_m ,升藿烷较丰富(图3),这与塔里木盆地台

盆区海相原油的分布特征一致。与来自中、上奥陶统烃源岩的LN11井原油比较^(5,7),三环萜烷丰度低,伽马蜡烷丰度高。低的三环萜烷含量表明原油运移距离近,高的伽马蜡烷丰度说明原油烃源岩沉积时水体分层现象明显。

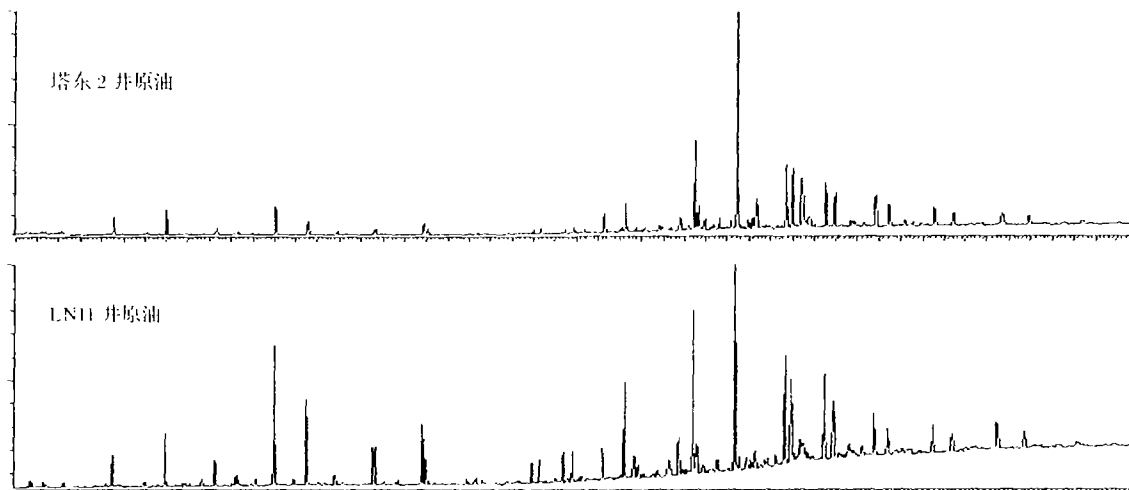


图3 塔东2井原油 $m/z191$ 质量色谱图及其与LN11井原油的比较

Fig.3 Comparison of $m/z191$ mass chromatogram of crude oil from Well Tadong and LN11

② 在 $m/z217$ 质量色谱图上,原油规则甾烷组成特征同样表现出与塔里木盆地台盆区海相原油相同的分布特点。与 LN11 井原油比较,该原油样品具有孕甾烷系列、重排甾烷、 $\alpha\beta$ 构型甾烷丰度低, C_{28} 甾烷丰度相对较高的特点,且甲基甾烷明显较为丰富(图 4),与寒武系烃源岩有较好的相似性^[4,5]。

在 $m/z231$ 质量色谱图上,塔东 2 井原油表现出甲藻甾烷、4-甲基甾烷丰度较高的特点(图 5a),与寒武系泥岩的分布面貌十分一致^[4],而与 LN11 井中上

奥陶统原油高 3-甲基甾烷、低甲藻甾烷、低 4-甲基甾烷的分布特征(图 5b)形成鲜明对照。研究表明,同 C_{28} 甾烷分布特征一样,甲藻甾烷、4-甲基甾烷等是一类具有时代意义的生物标志物^[4,5]。甾烷的上述组成特征同样表明了该原油与寒武系烃源岩之间的成因关系。

2.3 芳烃馏分组成

芳烃馏分的成因通常较为复杂。塔东 2 井原油芳烃馏分色谱特征如图 6 所示。其主要特征是多元稠环芳烃极其丰富,并存在一定丰度的三芳甾烷类化合物。

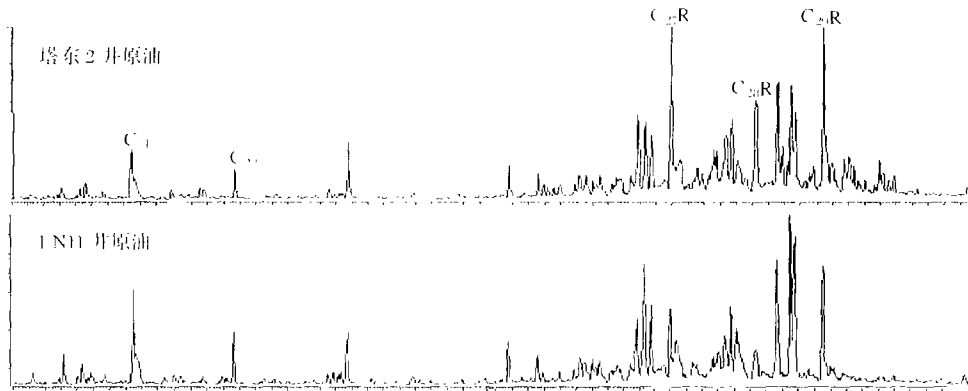
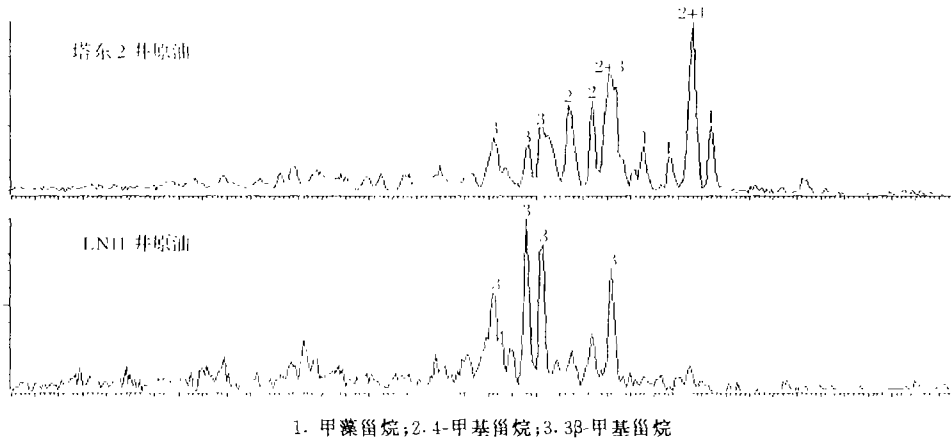


图 4 塔东 2 井原油 $m/z217$ 质量色谱图及其与 LN11 井原油的比较

Fig. 4 Comparison of $m/z217$ mass chromatogram of crude oil from Well Tadong and LN11



1. 甲藻甾烷; 2. 4-甲基甾烷; 3. 3 β -甲基甾烷

图 5 塔东 2 井原油 $m/z231$ 质量色谱图及其与 LN11 井原油的比较

Fig. 5 Comparison of $m/z231$ mass chromatogram of crude oil from Well Tadong and LN11

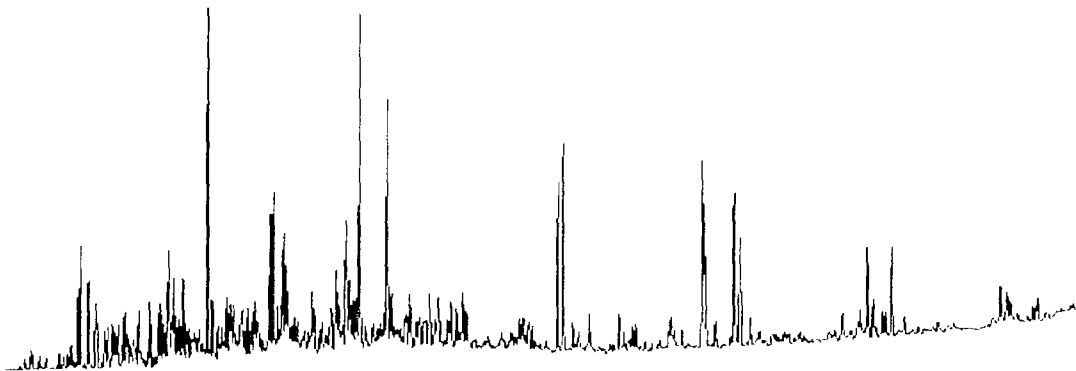


图 6 塔东 2 井原油芳烃馏分色谱图

Fig. 6 Chromatogram of aromatic hydrocarbons from Well Tadong crude oil

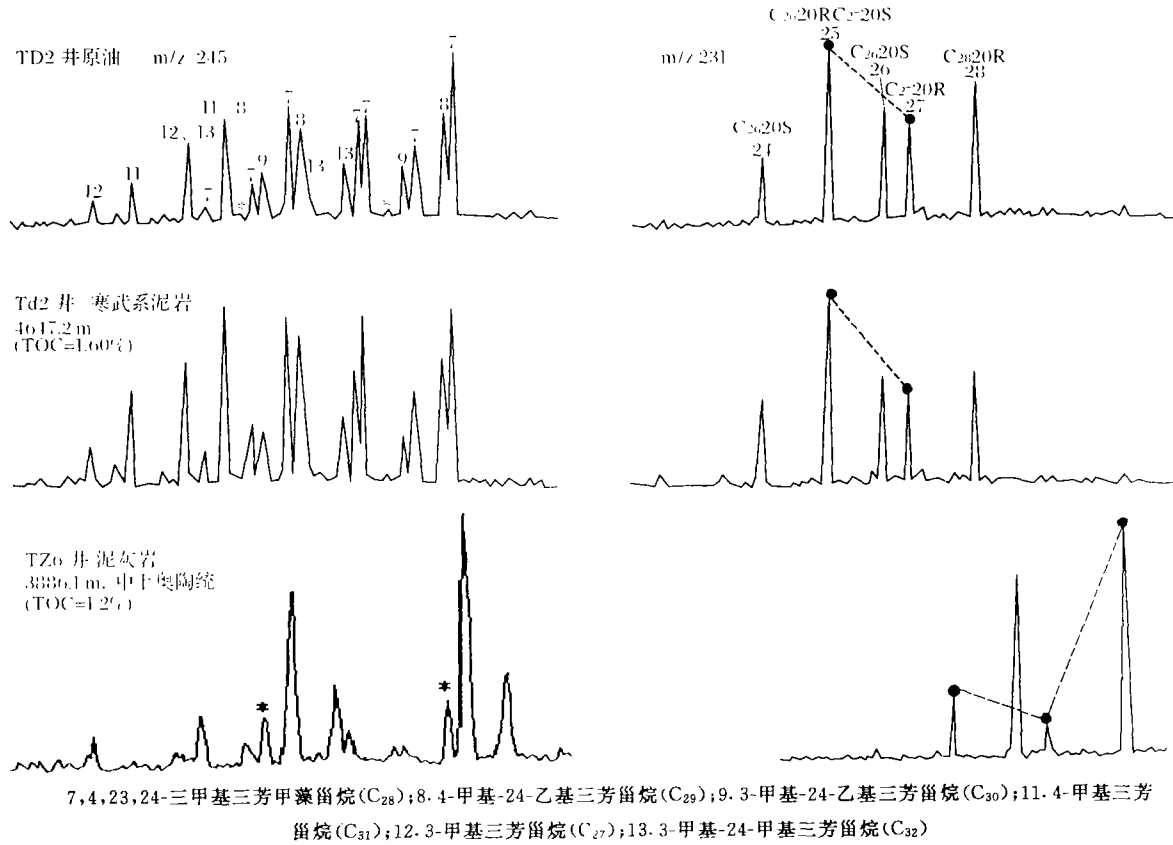


图7 原油芳香甾烷分布及其与寒武系、中上奥陶统烃源抽提物的比较

Fig.7 Comparison between aromatic sterene in crude oil and extracts from Cambrian and mid-upper Ordovician system

2.3.1 芳香甾烷组成

芳香甾烷是是甾类化合物的芳构化产物,因而其骨架类型与饱和烃馏分中甾烷类化合物基本相同。从m/z245质量色谱图可以看出,塔东2井原油中甲基三芳甾烷中存在较丰富的三芳甲藻甾烷和4-甲基三芳甾烷(图7a),与原油饱和烃馏分中甾烷的分布特征形成呼应,并与寒流武系烃源岩十分相似(图7b),明显区别于中上奥陶统烃源岩(图7c)。三芳甾烷组成中C₂₆-、C₂₇-化合物丰度高,明显区别于中上奥陶统的烃源岩和原油。

2.3.2 多环芳烃组成

原油多环芳烃组成的显著特征是不带烷基侧链的稠环芳烃十分发育,如蒾、蒽、荧蒽、苊、苯并[a]蒽、苯并荧蒽、苯并苊、二苯并蒽、苯并苊、蒽等(图6),其含量总和占芳烃馏分组成的30%以上。这些化合物在较高温度的热解残余物中普遍存在^[6,7],其中含有五环脂环芳烃(如蒾、荧蒽等)常是高温热产物中的特征性化合物^[8]。研究认为,地质体中较高含量的这类化合物通常与短期高温热事件有关^[6~10]。塔东2井原油芳烃馏的这种组成特点显然是与该油藏的成藏过程或保存时

间内的地质、地球化学条件联系在一起的。

3 油源分析

通过前述讨论可知,原油的轻烃、饱和烃馏分中的甾萜类组成等具有海相原油的组成特点。事实上,具有时代意义生物标志物(如C₂₈甾烷、伽马蜡烷丰度,甲藻烷、4-甲基甾烷分布等^[4,5])的分布特征已经显示了塔东2井原油与寒武系烃源岩的亲缘关系(图3~图5、图7)。进一步的统计和对比结果表明,塔东2井原油以其低的C₂₇-重排甾烷/C₂₇-规则甾烷、相对较高的伽马蜡烷/C₃₀-藿烷、甾烷组成中高的C₂₈-甾烷相对百分含量(图8)、较高的三芳甲藻甾烷、4-甲基甾烷含量等(图9)明显区别于中上奥陶统烃源岩,而与寒武系烃源岩具有较好的聚类关系。也就是说,塔东2井油藏是来源于寒武系的自生自储油藏。

4 结果与讨论

全油碳稳定同位素的分析表明,塔东2井原油的δ¹³C为-28.2‰,这与塔里木盆地海相原油δ¹³C值的分布存在较大差别:如轮南地区全油δ¹³C为-32.6‰~-33.1‰,塔河油田奥陶系原油δ¹³C为-32.3‰~-32.7‰。造成原油密度大、碳稳定同位素组成较重的

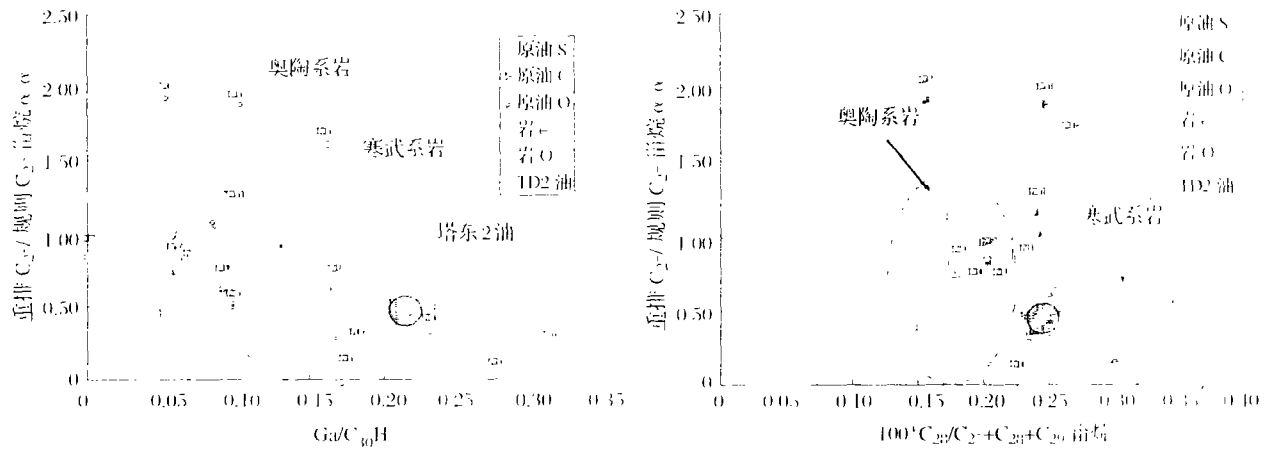


图 8 塔里木盆地台盆区原油和烃源岩甾萜类 GC/MS 参数统计和对比

Fig. 8 Comparison of geochemical parameters between oil from platform basin area and source rocks

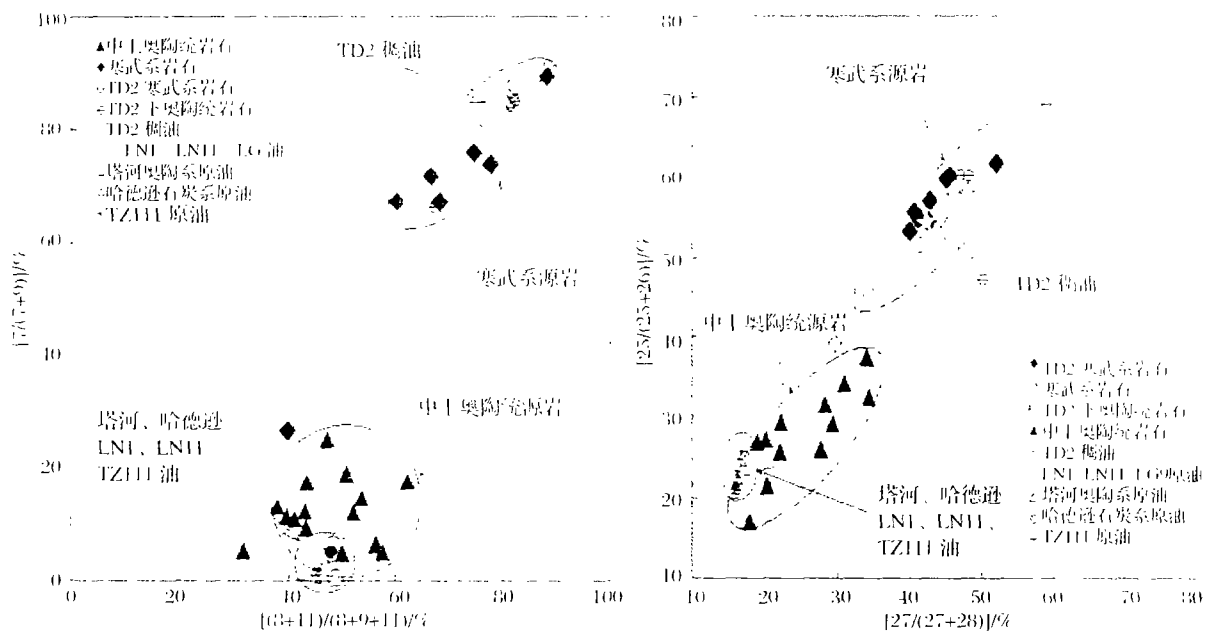


图 9 塔里木盆地台盆区原油和烃源岩芳香甾萜 GC/MS 参数统计和对比

Fig. 9 Comparison of geochemical parameters between oil from platform basin area and source rocks

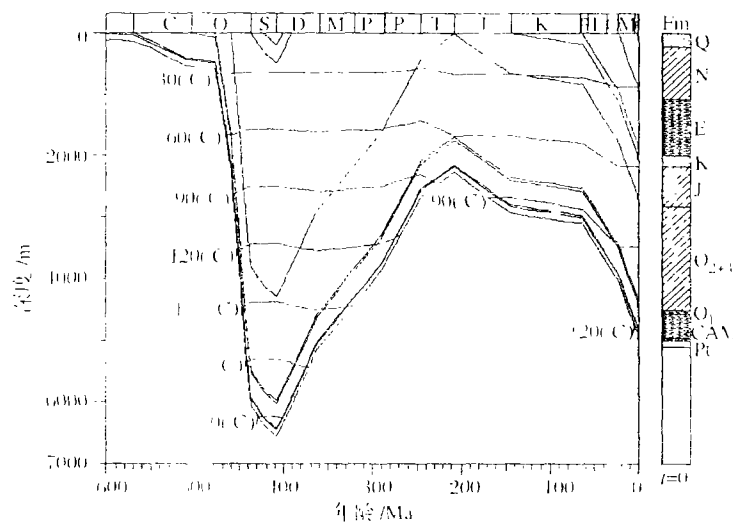


图 10 塔东 2 井单井埋藏史

Fig. 10 Burial history of Well Tadong

原因将在下面讨论。

4.1 成藏期分析

从塔东2井单井埋藏史分析(图10),塔东2井及塔东地区下奥陶统一寒武系源岩位于巨厚的中上奥陶统泥岩之下。正是这套巨厚地层的快速沉积过程,使塔东地区下奥陶统一寒武系源岩在晚奥陶世(450~500 MaBP)约10 Ma经历了主要的生油阶段。也就是说,烃源岩的生烃史决定了该油藏的主要形成期应是晚奥陶世的440~450 MaBP时期。与油包裹体共生的盐水包裹体均一化温度也为此提供了有力的佐证:其分布范围为130~200℃,说明油藏的充注也始于这一时期。

4.2 次生变化与原油化学组成的关系

晚海西—加里东期强烈的挤压作用导致构造裂缝和逆断层的发育,也致使自油藏充注后从志留纪末至三叠纪,油藏经历了持续的抬升过程(图10),使油藏轻组分散失并发生轻度的降解作用。同时,由于寒武系

—上奥陶统直接覆盖于盆地基底之上,塔东2井附近车尔臣等断裂切入基底的活动,可能导致了油藏范围内短暂的高温热液活动过程。油藏中呈明显各向异性的高反射率热解沥青(Pyobitumen,反射率高达3.3%~4.2%)的存在,为类似这类短期高温热事件的存在提供了直接证据。事实上,这与原油芳烃馏分中大量出现的多元稠环芳所表征的地球化学意义是一致的^[8~12]。这种短期高温热事件的活动对油藏至少存在下述双重作用:其一是物理作用过程,可能以热蒸发作用为其主要形式,其结果是造成原油轻组分的部分散失而导致原油变重;其二是热成熟作用,进一步的热演化过程导致原油化学组成的变化。一方面,热裂解作用造成烃类组份变化的同时,造成烃类碳稳定同位素的变重,如火成岩侵入后大西洋DSDP368钻孔中白垩系页岩生成的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 增加幅度可超过10‰^[9]。从塔里木盆地正常成因海相原油正构烷烃单体烃碳同位素与塔东2井原油的对比来看(图11),正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 均

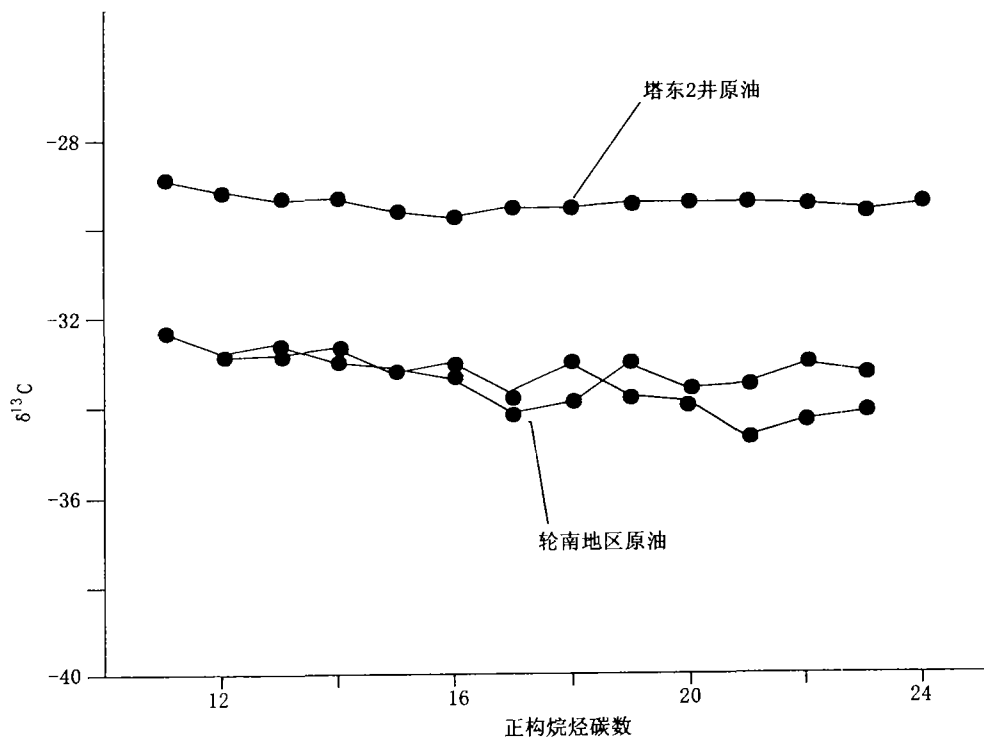


图11 塔东2井原油正构烷烃单体同位素分布及其与轮南地区原油的比较(引自孙永革,2002)

Fig. 11 Isotopic distribution of individual n -alkane of Tadong crude oil and comparison with crude oil from Lunan area (after Sun Yongge, 2002)

较正常海相原油普遍重约3‰。另一方面,以芳核为结构单元化合物的进一步缩聚过程导致了大分子量多元稠环芳烃的形成。

5 结论

(1) 塔东2井4561.93~5040.00 m原油的化学

组具有海相原油的特点。原油轻烃组成中低的苯、甲苯含量、低的甲基环己烷指数,萜类组成中相对较高的伽马蜡烷含量、甾烷组成中高的 C_{28} 烷、甲藻甾烷和4-甲甾烷、芳香甾烷中高丰度的三芳甲藻甾烷和4-甲基三芳甾烷等,表明塔东2井原油与寒武系烃源岩存在较

好的亲缘关系,具有自生自储的特点。原油中与运移有关的有关参数,如三环萜烷/三萜烷、 $\alpha\beta$ 甾烷/ $\alpha\alpha\alpha$ 甾烷等^[11],较低特征可能与原油的近距离运移有关。

(2) 原油高密度和高 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征,主要与保存时间内的短期高温热事件有关。塔东2井储层中各向异性的高反射率热解沥青(Pyobitumen)的存在、原油芳烃馏分中高丰度的多元稠环芳烃及单体烃同位素组成特点,为这种短期高温热事件的存在提供了有力证据。

参考文献(References)

- 1 Tissot B P 和 Welte. 石油的形成与分布. 北京:石油工业出版社, 1984
- 2 Thompson K F. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983,47:303~316
- 3 Mango. The origin of light cycloalkanes in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990,54:1315~1323
- 4 Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M. Paleozoic oil-source correlations in the Tarim basin, NW China. *Organic geochemistry*, 2000,31:267~272
- 5 张水昌,梁狄刚,黎茂稳,等. 分子地球化学与塔里木盆地油源对比. *科学通报*, 2002,47(增刊):16~23
- 6 Laflamme R E, Hites R A. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978,42:289~304
- 7 Ishiwatari R, Fukushima. Generation of unsaturated and aromatic hydrocarbons by thermal alteration of young kerogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979,43:1343~1349
- 8 Scott L T. Thermal rearrangements of aromatic compounds. *Accounts of Chemical Research*, 1982,15:52~58
- 9 Simoneit B R T. 火成岩侵入体对西洋(DSDP368)钻孔白垩系黑色页岩沉积有机质的影响. 中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放研究实验室研究所报, 1986. 422~463
- 10 Simoneit B R T. 加利福尼亚湾古亚依玛盆地不成熟硅藻土沉积物中的热液石油. 中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放研究实验室研究所报, 1986. 464~501
- 11 Dzou L I, Hughes W B. Geochemistry of oils and condensates, K. Field, offshore Taiwan: A case study in migration fractionation. *Organic Geochemistry*, 1993,20(4):437~462

Origin of Oils from Well Tadong 2 in Tarim Basin

XIAO Zhong-yao¹ HUANG Guang-hui² LU Yi-hong¹ ZHANG Qiu-cha¹ WU Yi¹

¹(Tarim Oil Field, PetroChina, Korla Xinjiang 841000)

²(Changjiang University, Jinzhou Hubei 434102)

Abstract Oils from Well Tadong2, Tarim Basin, characteristic of high density, high viscosity and heavy carbon isotopic composition, are marine oils due to compositional features of light hydrocarbons, cycloalkanes, steranes and triaromatic steranes. It can be seen that oils from Well Tadong2, Tarim Basin, are derived from Cambrian source rocks based on age-specific biomarker correlation studies. Recent oil compositional characteristics are probably related with the influence of high temperature geologic thermal event evidenced by pyrobitumen within reservoirs, PAH in aromatic fractions and carbon isotopic composition of alkanes

Key words marine oils, Cambrian source rocks, PAHs, high temperature geologic thermal event Tarim Basin