

柯坪隆起阿克苏油苗的地球化学特征及其成因研究

王秋玲¹, 贾望鲁^{1*}, 彭平安¹, 杨芝林², 肖中尧²

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 柯坪隆起区是塔里木盆地海相烃源岩露头发育较好的地区之一, 但相关的油气研究报道不多。本文详细研究了塔里木盆地柯坪隆起区油苗的有机地球化学特征并进行了相关的成因分析。阿克苏油苗经历了严重的生物降解作用, 饱和烃生物标志物所能提供的成因信息十分有限。原油沥青质组分及储层吸附/包裹烃受后生作用影响较小, 综合分析油苗沥青质热解产物与吸附/包裹烃的生物标志物及其碳同位素组成可以获得更多有效的成因信息。研究结果表明, 阿克苏油苗与其储层吸附/包裹烃具有不同来源。油苗、沥青质以及沥青质热解产物的碳同位素特征与已经报道的多数海相原油及其沥青质较为接近, 与典型的寒武系烃源来源的原油差异显著。而储层吸附/包裹烃与已报道的典型寒武系烃源岩来源油的生物标志物及碳同位素特征比较类似, 可能形成于较高的热演化阶段。

关键词: 油苗; 沥青质; 吸附/包裹烃; 碳同位素; 成因; 阿克苏

中图分类号: P593 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)01-0045-10

Geochemistry and its genetic implications of Akesu oil seepage in the Keping uplift

WANG Qiu-ling¹, JIA Wang-lu^{1*}, PENG Ping-an¹, YANG Zhi-lin² and XIAO Zhong-yao²

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Exploration and Development Research, Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

Abstract: Marine source rocks have long been reported in the Keping uplift from the Tarim basin, however, there were few studies concerned about oil and gas. Geochemical characteristics and its genetic implications of an oil seepage in the Keping uplift of the Tarim basin were well investigated in this work. Akesu oil seepage had undergone severe biodegradation, hence, little genetic information could be concluded from the distribution of biomarkers in saturates. Oil asphaltenes and the absorbed/occluded hydrocarbons are hardly affected by secondary alteration, therefore, a combination of biomarkers and carbon isotopic compositions of the asphaltene pyrolysates and absorbed/occluded hydrocarbons could yield more comprehensive information on the genesis of oils. The results indicate that Akesu oil seepage was derived from different sources of absorbed/occluded hydrocarbons. The carbon isotopic signatures of the oil seepage, the asphaltenes and the pyrolysates of asphaltenes are consistent with that of most marine oils reported in the Tarim Basin, which clearly distinguish them from typical oils derived from Cambrian source rocks. However, the distributional characteristics of both biomarkers and carbon isotopes of the absorbed/occluded hydrocarbons are very similar to that of typical oils sourced from Cambrian rocks. Moreover, it might be inferred that absorbed/occluded hydrocarbons was generated at a high maturity stage from the molecular parameters.

Key words: oil seepage; asphaltenes; absorbed/occluded hydrocarbons; carbon isotopes; geneses; Akesu

收稿日期(Received): 2011-06-17; 改回日期(Revised): 2011-09-19; 接受日期(Accepted): 2011-09-29

基金项目: 国家“十一五”油气重大专项(2008ZX05008-002); 国家自然科学基金(41073038); 广东省自然科学基金(9151064004000008)

作者简介: 王秋玲(1986-), 女, 硕士研究生, 油气地球化学专业。E-mail: wqiulingzsu@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): JIA Wang-lu, E-mail: wljia@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85291312

WANG Qiu-ling et al.: Geochemistry and its genetic implications of Akesu oil seepage in the Keping uplift

0 引言

塔里木盆地是我国最重要的海相原油产区,有多套烃源岩发育,且受多期次生烃的影响,油气的来源与成因一直是当前研究的热点之一^[1-9],已有研究多集中于环满加尔凹陷的塔北、塔中以及塔东地区。柯坪隆起区是盆地内海相烃源岩露头发育较好的地区之一,寒武-奥陶系海相烃源岩有机质类型好、丰度高,但相关详细的油气研究报道不多。

野外考察时笔者在柯坪隆起区阿克苏附近见到一处黑褐色油苗,可能对进一步理解盆地内海相原油的分布与成因具有重要的指示意义。初步的分析结果表明,该油苗经历了强烈的生物降解作用,低分子可溶部分中正构烷烃、无环类异戊二烯烷烃几乎被消耗殆尽,甾、萜类生物标志物也遭到强烈改造,有价值的来源与成因信息很难得到。原油沥青质是有机质热成熟作用较早阶段的产物,在结构上和母源干酪根最相似,与原油其他组分相比受生物降解、水洗等蚀变作用的影响较小,因此,沥青质热解可作为研究生物降解原油的重要技术手段之一^[10]。而吸附/包裹体烃等可以提供不同期次烃类充注的地球化学记录^[6,7,11]。本研究拟在常规分析基础上,利用沥青质热解烃与储层吸附/包裹体烃详细研究阿克苏油苗的地球化学特征,并探讨其成因意义。

1 样品与实验

1.1 样品

样品采集于阿克苏西南 30 km 公路旁的水泥厂开采点(图 1),共采集 3 件样品,其中样品 S3 为黑色油苗。S2 和 S5 为含油的白云石岩样,分别采于上寒武统下丘里克塔格组和中寒武统阿瓦塔格组-上寒武统。两样品部分开裂面可见大片黑褐色油迹,自然放置状态下可见某些裂隙或缝洞处有原油不断渗出。

1.2 实验分析

1.2.1 油苗与沥青质

二氯甲烷浸泡含油岩石样品,所得的浓缩物相当于油苗样品。油样加少许二氯甲烷溶解后进行沥青质的分离,具体过程参见文献^[13]。经沥青质分离的浸取物采用硅胶/氧化铝柱色谱分离出饱和烃与

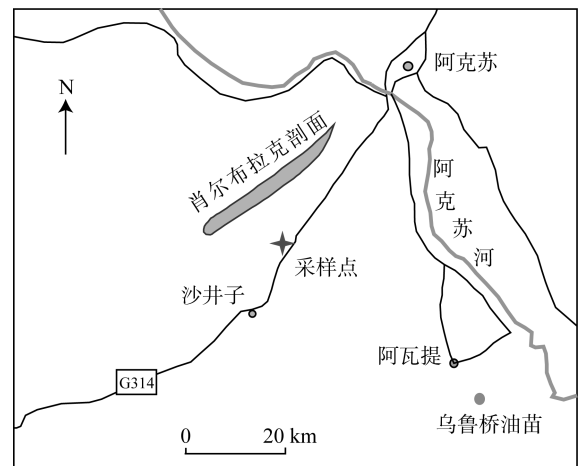


图 1 塔里木盆地柯坪隆起阿克苏油苗采样位置示意图^[9,12]

Fig.1 Sketch sampling map of Akesu oil seepage in the Keping uplift, Tarim Basin^[9,12]

芳烃组分。约 50 mg 沥青质放入黄金管中,氩气保护下焊封。然后置于电炉中在 320 °C 下热解 72 h。冷却后打开黄金管并用正己烷超声萃取热解产物,浓缩后的热解产物经柱色谱分离出饱和烃与芳烃组分。

1.2.2 储层吸附/包裹烃

吸附/包裹烃的提取方法参照文献^[6-7]。岩石样品经轻微破碎后筛选粒度为 10~20 目间的颗粒,用二氯甲烷+甲醇混合液索氏抽提(3 次,每次 3 d)以充分去除颗粒表面游离烃。抽提后的岩石颗粒磨碎至粉末(200 目以下),岩石粉末用二氯甲烷+甲醇混合液索氏抽提 3 d,抽提物经柱色谱分离出饱和烃和芳香烃组分。

1.2.3 色谱-质谱 GC-MS 分析

饱和烃和芳香烃组分用 Thermo Ultra Trace-DSQII 型色谱-质谱仪分析,色谱柱为 HP-5ms 柱(Agilent, 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm),质谱采集方法为全扫描和选择离子扫描同时进行。

1.2.4 瞬间热解-色谱-质谱分析

将约 0.5 mg 沥青质放入石英管中,两端塞玻璃棉,置于 CDS2000 型丝式热解仪中,热解温度为 710 (10 s),热解产物经 CDS1500 型接口进入 Finnigan Voyager-GC8000TOP 型色谱-质谱仪分析。

1.2.5 单体碳同位素分析

采用尿素络合法分离正构烷烃,正构烷烃的单体碳同位素分析采用 GV HP6890-IsoPrime 型气相色谱-同位素比值质谱仪。无分流进样,日常分析时采用 Indiana 大学的正构烷烃混合标样来检测仪器的准确度和精度,测试结果表明分析精度总体优于 0.5‰。

2 结果与讨论

2.1 油苗的地球化学特征

2.1.1 饱和烃

油苗饱和烃总离子流图显示较强的 UCM (图 2), 直链烷烃以及无环类异戊二烯烃基本检测不到, 指示油苗可能已经受到强烈的生物降解作用。

生物标志物的分布特征也支持油苗经历强烈生物降解过程的结论, 表现在: (1) 三环萜烷的相对强度远高于五环萜烷, C_{29} 以上藿烷几乎检测不到; 甾烷中低碳数的孕甾烷和升孕甾烷占优势, $C_{27}\sim C_{29}$ 规则甾烷破坏严重, 重排甾烷相对强度较高。有关原油生物降解的研究^[14]认为, 三环萜烷的抗生物降解能力强于藿烷, 而孕甾烷和重排甾烷的抗生物降解能力高于长链规则甾烷, 强烈的生物降解作用可致三环萜烷、重排甾烷和孕甾烷的相对强度增加。

(2) 五环萜烷中检出了完整的 25-降藿烷系列化合物 (m/z 177 质量色谱图, 图 2), 在 m/z 191 质量色谱图上 C_{29} 25-降藿烷的相对强度甚至高于常规的藿烷系列化合物, 指示原油受到严重生物降解, 达到 6~7 级^[14]。上述特征在塔北地区志留系沥青砂抽提物中十分常见^[13], 可能与储层由于地层抬升而曾经长期处于较低的地温条件有关, 这种条件下细菌的生物降解活动相对活跃。

因此, 阿克苏油苗经历了严重的生物降解作用, 甾、萜类生物标志物已遭到强烈的改造, 直接用来进行相关的母源与成因研究十分困难。

2.1.2 原油沥青质热解产物

沥青质瞬间热解产物主要为正构烷烃/1-烯烃 (图 3), 碳数分布很宽, 可延至 C_{30} 以上。一个值得注意的特征是所检出的 1,2,3,4-四甲基苯并未具有明显的丰度优势, 而这与已报道的盆地内多数海相原油沥青质明显不同^[15]。

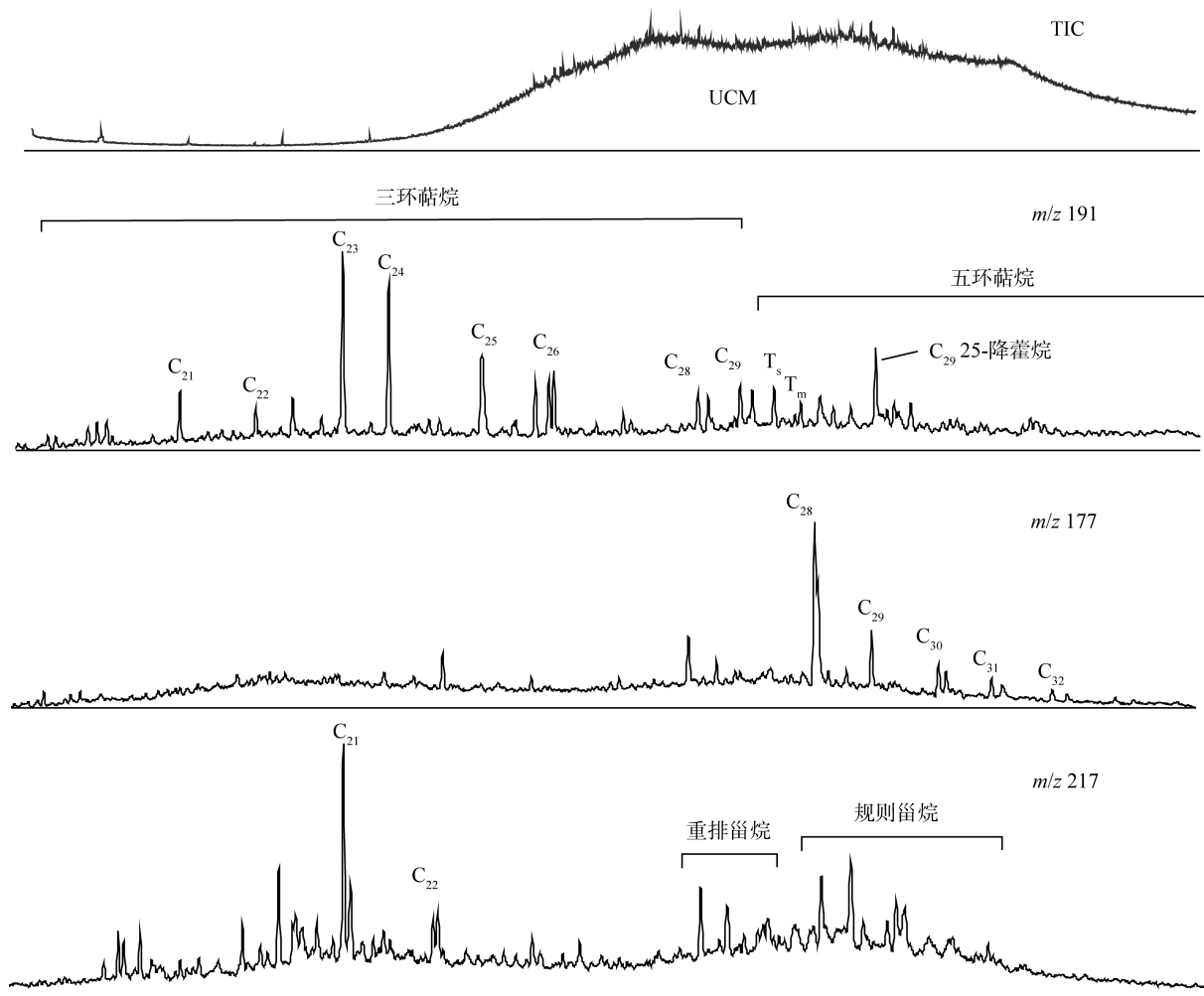


图 2 阿克苏油苗饱和烃生物标志物分布特征

Fig.2 Biomarker distributions of saturates of Akesu oil seepage

沥青质封闭体系下的热解产物以 $C_9\sim C_{25}$ 低碳数正构烷烃为主(图 4), 姥鲛烷和植烷的丰度很低。笔者前期^[13]在盆地内志留系沥青砂沥青质热解产物中普遍检出了完整的藿烷和甾烷系列化合物。而阿克苏油苗沥青质热解产物中重排甾烷和 $C_{27}\sim C_{29}$ 常规甾烷几乎检测不到, 五环萜烷也仅见

T_m 、 C_{29} 及 C_{30} 藿烷。三环萜烷和孕甾烷含量却很高, 而且三环萜烷中低碳数($C_{19}\sim C_{21}$)三环萜烷的相对丰度最高。前人研究^[14]表明成熟度增高可能会导致三环萜烷和低碳数甾烷相对含量的升高。本次实验结果可能表明阿克苏油苗形成于较高的成熟阶段。

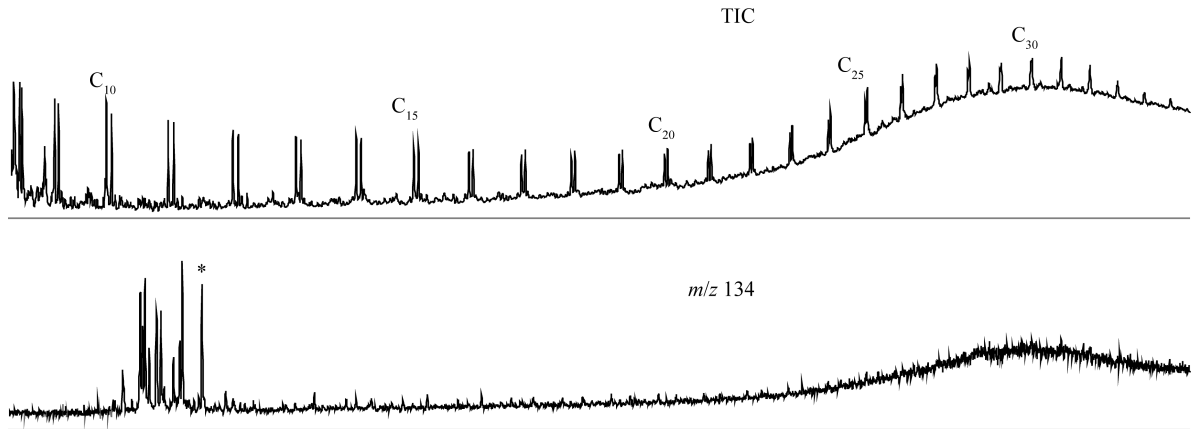


图 3 油苗沥青质瞬间热解产物特征 (*代表 1,2,3,4-四甲基苯)

Fig.3 The distributional characteristics of pyrolysates yielded from flash pyrolysis of asphaltene in the Akesu oil seepage (* denotes 1,2,3,4-tetramethylbenzene)

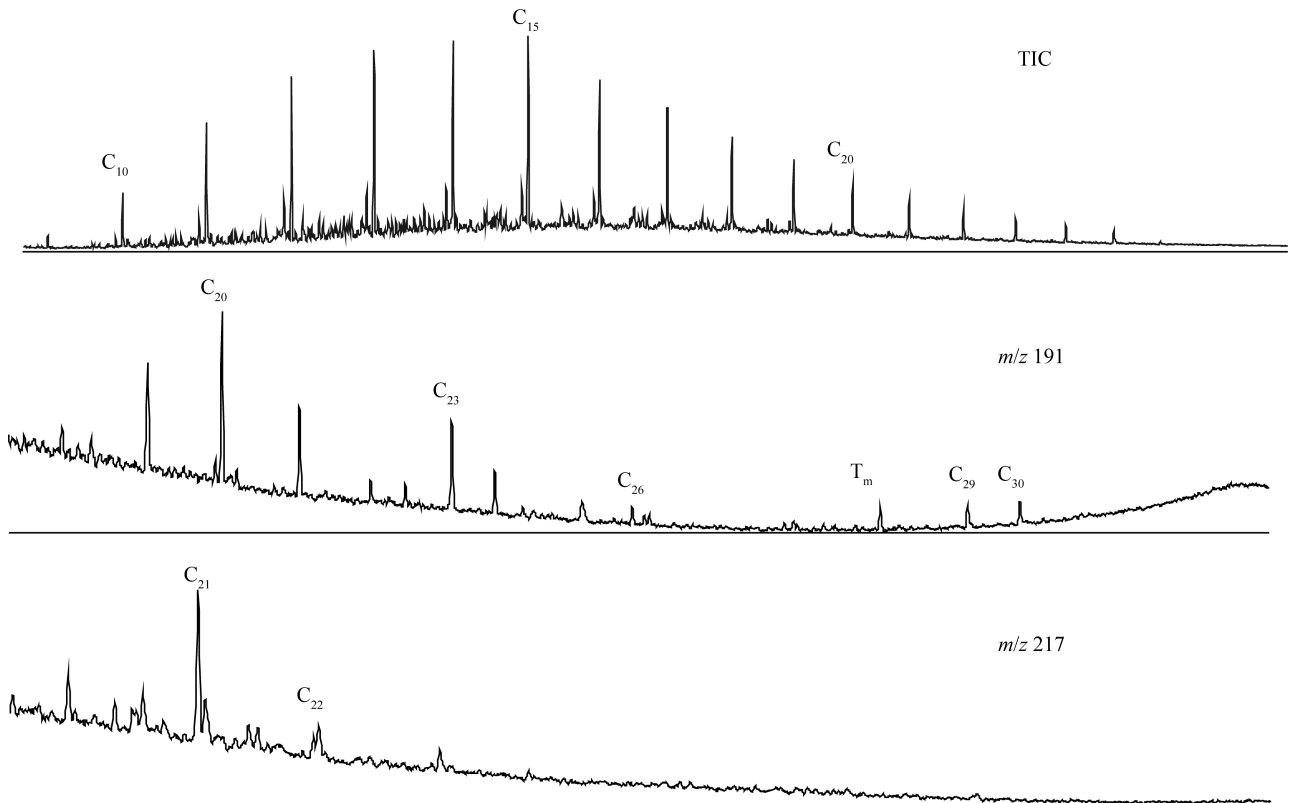


图 4 油苗沥青质封闭体系热解产物特征

Fig.4 The distributional characteristics of products of asphaltene in oil seepage upon pyrolysis in closed systems

2.2 吸附/包裹烃的地球化学特征

储层吸附/包裹烃的饱和烃总离子流图基线略微隆起(图 5), 正构烷烃高碳数分布较完整, 姥鲛烷和植烷的相对含量较高, 显示轻微的生物降解特征。萘烷类生物标志物以五环萘烷为主, 三环萘烷的相对丰度较低。藿烷类化合物中 C_{30} 藿烷的相对强度最高, 伽马蜡烷的相对丰度较高, 伽马蜡烷/ C_{31} 升藿烷比值在 0.36~0.39 之间, 指示源岩形成于水体分层的沉积环境^[14]。甾烷类化合物 C_{27} ~ C_{29} 规则甾烷的相对含量较高, 孕甾烷和重排甾烷相对丰度低(图 5)。值得注意的是, C_{28} 规则甾烷丰度比较高, 与 C_{27} 规则甾烷含量相当, $C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$ 比值达 28%~30%, 呈反“L”型分布。

部分成熟度参数显示吸附/包裹烃可能形成于较高的成熟度阶段。 C_{31} 22S/(22S+22R)升藿烷比值落在 0.56~0.58 之间, 已达到平衡状态; $T_s/(T_s+T_m)$

比值为 0.55~0.66; 甲基菲 MPR 比值($MPR=(3-MP+2-MP)/(9-MP+1-MP)$ ^[16])在 1.41~1.55 之间, 远高于塔里木海相原油整体水平(MPR 比值小于 1.0), 与被认为是寒武系来源的塔中 62 井原油的结果较为接近^[2]。

2.3 碳同位素特征

2.3.1 油苗

阿克苏油苗总体的 $\delta^{13}C$ 值在 -34.1‰ ~ -34.7‰ 之间, 沥青质组分的 $\delta^{13}C$ 值为 -34.4‰ ~ -35.0‰, 略轻于全油碳同位素。

两个油苗沥青质热解产物正构烷烃分子碳同位素分布如图 6 所示, $\delta^{13}C$ 值在 -33.0‰ ~ -35.1‰ 之间。样品 S2 正构烷烃碳同位素相对全油(-34.7‰)和沥青质(-34.5‰)略偏重; 而 S5 沥青质热解产物与全油(-34.9‰)和沥青质(-34.5‰)较为一致, 分子碳同位素组成与已报道的典型的 中-上奥陶统烃源来源的原油(英买 2 井)^[6]及其沥青质热解产物^[15]落在同一范围内。

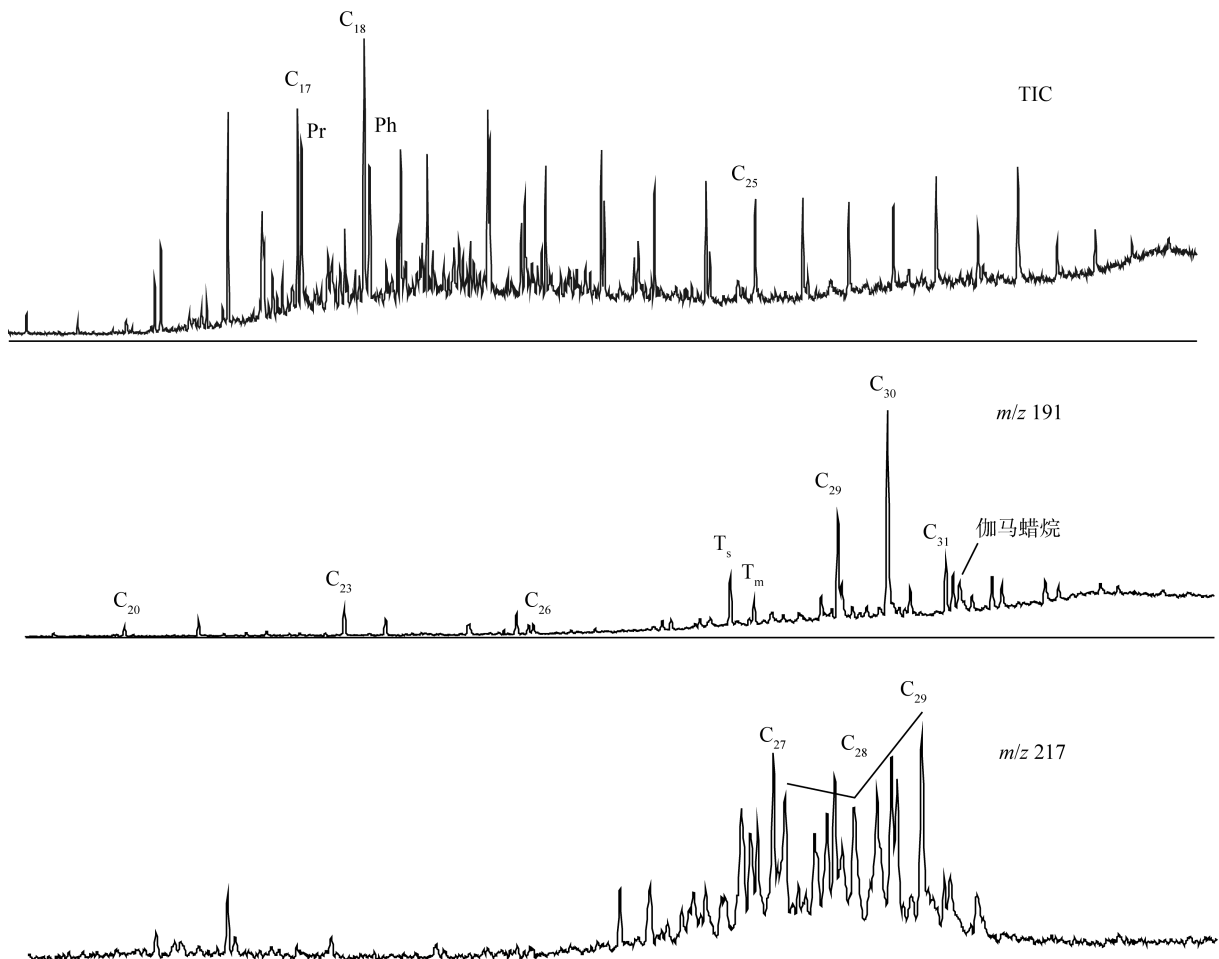


图 5 储层吸附/包裹烃中饱和烃的生物标志物分布特征

Fig.5 Biomarker distributions of saturates isolated from reservoir absorbed occlusions

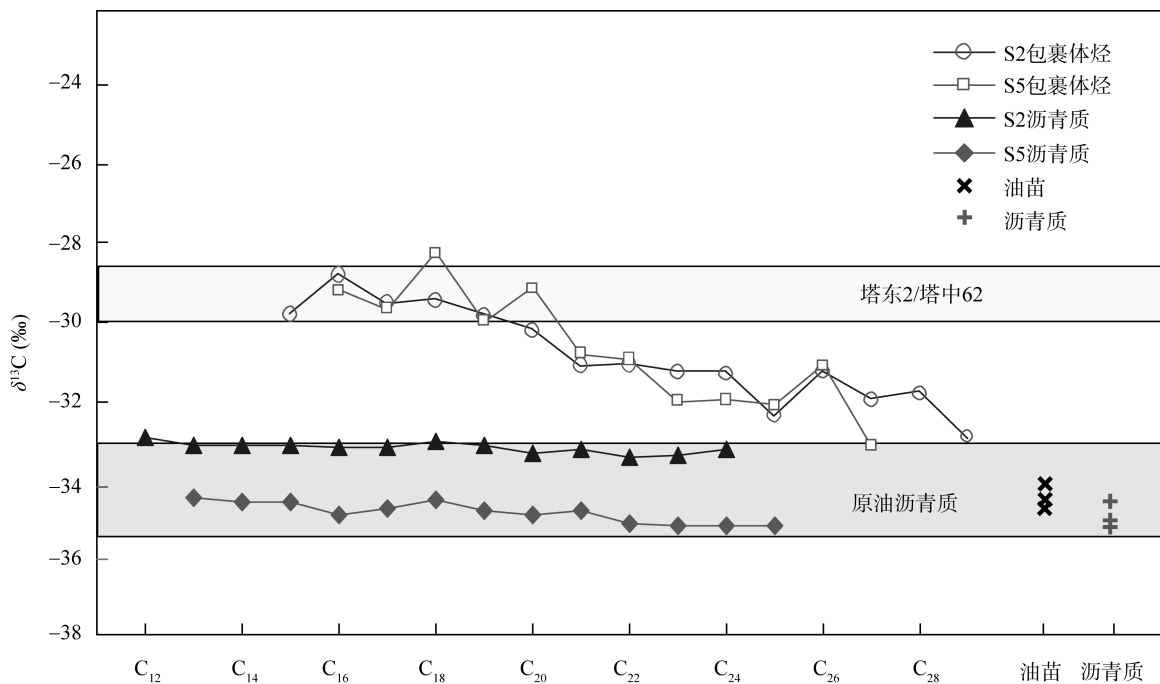


图6 阿克苏油苗及其吸附/包裹烃碳同位素分布特征

Fig.6 Distributions of the carbon isotopic profiles of the Akesu oil seepage and the absorbed occlusion hydrocarbons. The two bands indicate the ranges of carbon isotopic compositions of *n*-alkanes in the oils from well TD2 and TZ62 and the pyrolysates of oil asphaltens from Tabei and Tazhong uplift [6,13], respectively.

2.3.2 吸附/包裹烃中正构烷烃单体碳同位素

S2 和 S5 样品吸附/包裹烃正构烷烃组成非常一致, $\delta^{13}\text{C}$ 总体上在 $-28\text{‰} \sim -32\text{‰}$ 之间, 随碳数的增加, 正构烷烃呈现逐渐贫 ^{13}C 的趋势。吸附/包裹烃低碳数部分 ($\text{C}_{14} \sim \text{C}_{20}$) 正烷烃的碳同位素组成范围与文献[6]报道的典型的来自于寒武系烃源岩的原油比较接近, 而高碳数正构烷烃则相对偏轻约 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 左右。

2.4 讨论

2.4.1 油苗的母源

阿克苏油苗经历了严重的生物降解作用, 甾、萜类生物标志物遭到强烈的改造; 沥青质热解产物中生物标志物的分布特征可能反映相对高的成熟阶段, 所能提供的成因信息也十分有限。相比之下, 油苗以及沥青质组分的碳同位素组成对了解油苗的成因具有重要的指示意义。

不同有机质类型的源岩生成原油的碳同位素存在一定的差异, 腐殖质型陆相原油的碳同位素一般为 $-25\text{‰} \sim -27\text{‰}$, 而腐泥质海相原油在 $-29\text{‰} \sim -35\text{‰}$ 之间[17]。除了有机质来源, 成熟度、各种次生作用(如生物降解和水洗等)均可导致原油碳同位素

发生分馏效应。无论是成熟度增加还是生物降解作用, 一般会导致全油的碳同位素变重。阿克苏油苗生物标志物显示出严重生物降解特征, 原始油可能比现在碳同位素组成 ($-34.1\text{‰} \sim -34.7\text{‰}$) 还要轻。如此低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 表明油苗母源主要为海相烃源岩。

目前对于盆地内海相原油母源的认识主要集中于寒武-下奥陶统和中-上奥陶统两套海相烃源岩。尽管盆地内海相原油的来源存在较多争论, 但较为公认的是塔东 2 井寒武系顶部的原油来自下伏的寒武系烃源岩[1,4,6], 塔中 62 井原油也被证实与塔东 2 井原油具有十分一致的地球化学特征[2,6]。据已有研究, 塔东 2 井稠油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -28.5‰ [4], 具有寒武系生物标志物特征的阿瓦提油苗为 -29.4‰ [9], 塔中 62 井志留系原油正构烷烃的碳同位素组成在 $-29\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 之间[6]。由此可见, 从原油碳同位素组成上来看, 阿克苏油苗与典型的源于寒武系烃源岩的原油相差较大。

油苗沥青质的同位素组成在 $-34.4\text{‰} \sim -35.0\text{‰}$ 之间, 其组成范围与笔者前期工作对塔北、塔中地区原油以及沥青砂抽提物中沥青质的结果 ($-32\text{‰} \sim -34\text{‰}$, 英买 2 井为 -33.7‰) [13,15] 较为接近。阿克苏油苗沥青质热解产物正构烷烃单体碳同位素在

-33.0‰ ~ -35.1‰间, 呈近水平的分布模式, 与已经报道的盆地内海相原油和沥青砂抽提物沥青质落在同一范围内(-33‰ ~ -36‰, 英买 2 井平均为 -35.1‰)^[13,15]。

塔里木盆地塔中、塔北等主力产油区的多数海相原油碳同位素组成在-31.7‰ ~ -34.4‰间^[3,5,8], 变化范围较大。根据已有研究^[6], 塔中地区以及塔北轮南地区的部分原油及其正构烷烃具有较重的碳同位素组成, 可能指示了来自寒武系烃源原油的混入。由此推测, 来自于中-上奥陶统烃源原油可能具有较轻的碳同位素组成^[6]。例如英买 2 井原油碳同位素组成为-32.9‰^[5], 其正构烷烃分子碳同位素组成约为-35‰^[6]。

中-上奥陶统(萨尔干组-印干组)泥质烃源岩是柯坪地区较好的生油层系。但是, 据王飞宇等^[18]研究, 该区中-上奥陶统萨尔干组烃源岩干酪根具有较重 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-27.4‰ ~ -29.3‰), 其正构烷烃单体碳同位素组成(-30‰ ~ -33‰)^[19]也偏重。近期的一些研究指出^[11], 中-上奥陶统烃源岩中正构烷烃的同位素组成相对较重, 并不能与原油直接对比。但目前已经报道的中-上奥陶统烃源岩的碳同位素组成数据不多, 而且中-上奥陶统烃源岩在沉积相上存在较大变化, 不足以完全否认两者之间的相关性。例如在卢鸿(私人交流)对萨尔干组-印干组烃源岩的研究结果中, 正构烷烃单体碳同位素的分布范围较广(-30‰ ~ -34‰)。此外, 在热演化过程中, 同位素分馏作用可能会导致分子碳同位素组成发生显著的变化^[20]。在生油期向上运移排出的原油, 成熟度相对较低, 可能会比烃源岩高演化阶段裂解生成的残余烃相对贫 ^{13}C , 从而导致两者之间存在一定的碳同位素差异。

前文提到, 油苗沥青质瞬间热解产物中未能检出较强的 1,2,3,4-四甲基苯, 可能与油苗为较高成熟阶段产物有关。据前人研究^[21], 当 II 型干酪根 R^0 大于 0.7%, 热解产物中原本具有的 1,2,3,4-四甲基苯优势将消失。同时, 我们注意到, 沥青质封闭体系热解产物中姥鲛烷和植烷几乎检测不到, 同时三环萜烷和低碳数孕甾烷的相对强度远高于藿烷和规则甾烷, 也支持油苗成熟度较高这一结论。

2.4.2 吸附/包裹烃的成因

柯坪地区是盆地边缘下寒武统(玉尔吐斯组)以及中-上奥陶统(萨尔干组-英干组)泥质烃源岩的典型露头区。前者发育有一套克拉通边缘欠补偿盆地

相泥质烃源岩, 烃源岩已进入了高-过成熟度阶段^[22]; 后者为半闭塞欠补偿陆源海湾相页岩烃源岩, 处于生油后期阶段^[18], 成熟度比下寒武统烃源岩偏低。两套烃源岩均具有类似的高伽马蜡烷、高 C_{28} 规则甾烷等特征^[1,2,23], 但萨尔干组-印干组烃源岩中生物标志物绝对含量较低, 而且姥鲛烷和植烷相对含量低(卢鸿, 私人交流), 重排甾烷相对含量较高^[23]。相比之下, 储层吸附/包裹烃的分子组成特征与寒武系烃源岩较为接近。

单体碳同位素组成上, 吸附/包裹烃正构烷烃与油苗沥青质热解产物存在明显的差异(图 6)。吸附/包裹烃正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为-28‰ ~ -32‰: 低碳数正构烷烃($\text{C}_{14}\sim\text{C}_{20}$)的 $\delta^{13}\text{C}$ 在-28‰ ~ -30‰之间, 与已报道的来自寒武系的两个原油塔东 2 和塔中 62^[6]十分一致, 也与寒武系烃源岩的碳同位素 -29‰ ~ -31‰^[6]处于同一范围内; 高碳数正构烷烃($\text{C}_{21}\sim\text{C}_{29}$)的 $\delta^{13}\text{C}$ 在-30‰ ~ -32‰之间, 更接近于盆地多数海相原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

造成这种现象的原因可能主要有三个: 混合过程、较高的成熟阶段以及母源差异。

(1)有关塔里木两类混源油的配比实验^[24]表明, 如果寒武系来源的原油比例占到 20%以上, 那么混合油的生物标志物分布特征就主要体现为典型的寒武系原油的特征。因此, 尽管本研究两个岩石样品吸附/包裹烃具备了寒武系原油的生物标志物特征, 但不能完全排除后期烃类充注的贡献。吸附/包裹烃正构烷烃的碳同位素分布特征可以用两类原油的混合过程来解释: 寒武系原油可能形成于较高的成熟阶段, 低碳数正构烷烃的相对含量较高, 混合过程对其同位素特征影响较小, 主要体现寒武系原油特征, 而高碳数正构烷烃的碳同位素特征则受混合过程影响较大。

(2)吸附/包裹烃正构烷烃右倾的分布模式也可能是成熟度较高的结果。据 BJORØY *et al.*^[20]研究认为, 生油高峰前, 成熟度较低时, 正构烷烃分子碳同位素随碳数增加而变重; 成熟阶段, 呈近水平分布模式; 生油高峰期后, 随着成熟度的增加, 高碳数部分碳同位素则表现为相对较轻。生物标志物中较高 $T_s/(T_s+T_m)$ 比值、 $\text{C}_{31} 22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 升藿烷比比值以及高甲基菲 MPR 比值(1.41~1.55)也支持上述结论。

(3)塔里木盆地东部英吉苏凹陷龙口 1 井原油正构烷烃的碳同位素组成与阿克苏油苗储层吸附/包裹烃十分类似, 也具有右倾分布特征, 可以与英东 2

井下奥陶统烃源岩的正构烷烃碳同位素组成直接对比^[25]。这表明, 储层包裹体正构烷烃所体现的同位素组成也可能继承了母源的同位素组成特征。笔者近期对盆地内中-下寒武统烃源岩的研究表明, 正构烷烃的碳同位素组成大多在-28‰ ~ -31‰之间(未发表数据), 随碳数增加逐渐富集¹²C。这一范围与前人的研究结果基本一致^[11]。

上述因素可能都影响到吸附/包裹烃的同位素组成, 但吸附/包裹烃应该主要体现寒武系-下奥陶统来源烃类的贡献, 如果其他烃源的贡献较大, 那么正构烷烃的同位素组成不大可能还落在典型的寒武系原油以及烃源岩的范围内。

结合前人对盆地内油气母源的研究结果^[1-9,11,13,15,18,23], 本研究所获得的储层吸附/包裹烃记录了寒武系烃源岩在早期地质过程中可能发生的生烃过程, 油苗的碳同位素特征则与寒武系烃源岩差异显著。这一结果表明, 寒武系烃源岩形成的烃类在后期漫长的地质历史过程中保存程度较差, 因而对油苗有机质的贡献较小。然而, 紧邻柯坪地区的阿瓦提凹陷(柯坪地区以东)发现了源于寒武系烃源岩的油苗^[9](乌鲁木齐油苗, 图 1), 表明寒武系烃源岩可能对盆地内油气有重要贡献。寒武系烃源岩生烃贡献的保存程度在不同地区可能存在较大差异。事实上, 前人的研究结果表明寒武系烃源岩对原油的贡献即使在同一口钻井中也存在较大的差异。例如, 塔中 62 井志留系原油无论是生物标志物组成还是碳同位素组成都支持其主要来自寒武系烃源岩^[2,6], 而同一口井的奥陶系原油则指示了中-上奥陶统烃源岩的显著贡献^[6], 可能与志留系地层中存在被泥岩包围的砂岩透镜体等特殊的保存条件有关^[2]。

3 结 论

阿克苏油苗、沥青质热解产物及储层吸附/包裹烃的生物标志物组成和碳同位素特征指示油苗与其储层吸附/包裹烃具有不同的来源。储层吸附/包裹烃与已报道的典型寒武系烃源岩来源油的生物标志物与碳同位素特征较为类似, 可能形成于较高的热演化阶段。而阿克苏油苗经历了强烈的生物降解过程, 油苗以及沥青质热解产物的碳同位素特征与已经报道的多数海相原油较为接近, 与典型的寒武系烃源岩来源的原油差异显著。

对于曾经遭受了强烈生物降解的油苗而言, 综合油苗沥青质热解与吸附/包裹烃等分析技术可以获得更多有效的成因信息。

感谢中国科学院广州地球化学研究所熊永强和卢鸿两位老师在野外采样工作中提供的帮助!

参考文献(References):

- [1] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 肖中尧, 何忠华. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. 科学通报, 2002, 47(S1): 16-23.
Zhang Shuichang, Liang Digang, Li Maowen, Xiao Zhongyao, He Zhonghua. Molecular fossils and oil-source rock correlations in Tarim Basin, NW China[J]. China Sci Bull, 2002, 47(s1): 20-27.
- [2] 肖中尧, 卢玉红, 桑红, 潘振中, 李毓丰. 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.
Xiao Zhong-yao, Lu Yu-hong, Sang Hong, Pan Zhen-zhong, Li Yu-feng. A typical Cambrian oil reservoir: Origin of oil reservoir in Well TZ62, Tarim basin[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 155-160 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王传刚, 王铁冠, 何发岐, 王君奇. 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): 155-127.
Wang Chuan-gang, Wang Tie-guan, He Fa-qi, Wang Jun-qi. Stable carbon isotope and its significance in hydrocarbon accumulation in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Pet Geol, 2005, 26(2): 155-127 (in Chinese with English abstract).
- [4] 唐友军, 王铁冠. 塔里木盆地塔东 2 井寒武系稠油分子化石与油源分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(6): 18-22.
Tang You-jun, Wang Tie-guan. Molecular fossils and oil-source rock correlations of Cambrian heavy oil in Tadong 2 well in Tarim Basin[J]. J China Univ Pet, 2007, 31(6): 18-22 (in Chinese with English abstract).
- [5] 卢玉红, 肖中尧, 顾乔元, 张秋茶. 塔里木盆地环哈拉哈塘海相油气地球化学特征与成藏[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(zkII): 167-176.
Lu Yuhong, Xiao Zhongyao, Gu Qiaoyuan, Zhang Qiucha. Geochemical characteristics and accumulation of marine oil and gas around Halahatang depression, Tarim Basin, China[J]. Sci China (D), 2008, 51(zk1): 195-206.
- [6] Li Su-mei, Pang Xiong-qi, Jin Zhi-jun, Yang Hai-jun, Xiao Zhong-yao, Gu Qiao-yuan, Zhang Bao-shou. Petroleum source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin: New insights from geochemical and fluid inclusion data [J]. Org Geochem, 2010,

- 41(6): 531–553.
- [7] Gong S, George S C, Volk H, Liu K, Peng P. Petroleum charge history in the Lunnan Low Uplift, Tarim Basin, China – Evidence from oil-bearing fluid inclusions[J]. *Org Geochem*, 2007, 38(8): 1341–1355.
- [8] 米敬奎, 张水昌, 陈建平, 王晓梅. 塔北地区原油碳同位素组成特征及影响因素[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(1): 21–25.
Mi Jing-kui, Zhang Shui-chang, Chen Jian-ping, Wang Xiao-mei. Carbon isotopic compositions and effect factors of oil from Northern Tarim Basin[J]. *Pet Explor Develop*, 2010, 37(1): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- [9] 卢玉红, 钱玲, 张海祖, 黄龙藏, 吴建国, 何芬贤. 塔里木阿瓦提凹陷乌鲁桥油苗地化特征及来源[J]. *海相油气地质*, 2008, 13(2): 45–51.
Lu Yu-hong, Qian Ling, Zhang Hai-zu, Huang Long-cang, Wu Jian-guo, He Fen-xian. Origin and geochemical characteristics of Wuluqiao Oil Seepage in Awat Sag, Tarim Basin[J]. *Mar Orig Pet Geol*, 2008, 13(2): 45–51 (in Chinese with English abstract).
- [10] Rubinstein I, Spyckerelle C, Strausz O P. Pyrolysis of asphaltene: A source of geochemical information[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43(1): 1–6.
- [11] 王劲骥, 潘长春, 姜兰兰, 吕修祥, 李建交. 塔中 4 油田石炭系储层不同赋存态烃类分子和碳同位素对比研究[J]. *地球化学*, 2010, 39(5): 479–490.
Wang Jin-ji, Pan Chang-chun, Jiang Lan-lan, Lü Xiu-xiang, Li Jian-jiao. Molecular and carbon isotope correlation of free, adsorbed and inclusion oils from the Carboniferous sandstone in the Tazhong 4 oilfield [J]. *Geochimica*, 2010, 39(5): 479–490 (in Chinese with English abstract).
- [12] 钱逸, 尹恭正, 肖兵. 新疆下寒武统玉尔吐斯组软舌螺口盖和口盖状化石[J]. *微体古生物学报*, 2000, 17(4): 404–415.
Qian Yi, Yin Gong-zheng, Xiao Bing. Opercula of hyoliths and operculum-like fossils from the Lower Cambrian Yuertus Formation, Xinjiang[J]. *Acta Micropalaeontol Sinica*, 2000, 17(4): 404–415 (in Chinese with English abstract).
- [13] Jia Wang-lu, Xiao Zhong-yao, Yu Chi-ling, Peng Ping-an. Molecular and isotopic compositions of bitumens in Silurian tar sands from the Tarim Basin, NW China: Characterizing biodegradation and hydrocarbon charging in an old composite basin[J]. *Mar Pet Geol*, 2010, 27(1): 13–25.
- [14] Peters K E, Waters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 608–705.
- [15] 贾望鲁, 彭平安, 肖中尧. 塔里木盆地典型海相原油沥青质中 1,2,3,4-四甲基苯的碳同位素组成——母源形成于强还原环境的证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(1): 94–98.
Jia Wanglu, Peng Pingan, Xiao Zhongyao. Carbon isotopic compositions of 1,2,3,4-tetramethylbenzene in marine oil asphaltene from the Tarim Basin: Evidence for the source formed in a strongly reducing environment[J]. *Sci China (D)*, 2008, 51(4): 509–514.
- [16] 包建平, 王铁冠, 周玉琦, 余福祥, 王金渝, 周绮丽, 陈发景. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. *江汉石油学院学报*, 1992, 14(4): 8–13.
Bao Jian-ping, Wang Tie-guan, Zhou Yu-qi, Yu Fu-xiang, Wang Jin-yu, Zhou Qi-li, Chen Fa-jing. The relationship between methyl phenanthrene ratios and the evolution of organic matter[J]. *J Jiangnan Pet Inst*, 1992, 14(4): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- [17] 赵孟军, 黄第藩. 初论原油单体烃系列碳同位素分布特征与生油环境之间的关系[J]. *地球化学*, 1995, 24(3): 254–260.
Zhao Meng-jun, Huang Di-fan. Preliminary discussion on carbon isotopic distribution pattern of individual hydrocarbon from crude oil and its relationship to oil-forming environment[J]. *Geochimica*, 1995, 24(3): 254–260 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王飞宇, 杜治利, 张宝民, 赵孟军. 柯坪剖面中上奥陶统萨尔干组黑色页岩地球化学特征[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(6): 687–689.
Wang Fei-yu, Du Zhi-li, Zhang Bao-min, Zhao Meng-jun. Geochemistry of Salgan black shales of Middle-Upper Ordovician in Keping outcrop, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Pet Geol*, 2008, 29(6): 687–689 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨楚鹏, 张宝民, 王飞宇, 卢玉红, 肖七林, 张海祖, 廖泽文, 耿安松. 塔里木盆地塔中 4 石炭系油藏成藏过程再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(2): 181–188.
Yang Chu-peng, Zhang Bao-min, Wang Fei-yu, Lu Yu-hong, Xiao Qi-lin, Zhang Hai-zu, Liao Ze-wen, Geng An-song. Reassessment of the carboniferous oil pooling in TZ4 field, the Tarim Basin[J]. *Oil Gas Geol*, 2008, 29(2): 181–188 (in Chinese with English abstract).
- [20] Bjorøy M, Hall P B, Hustad E, Williams J A. Variation in stable carbon isotope ratios of individual hydrocarbons as a function of artificial maturity[J]. *Org Geochem*, 1992, 19(1-3): 89–105.
- [21] Lis G P, Mastalerz M, Arndt S. Increasing maturity of kerogen type II reflected by alkylbenzene distribution from pyrolysis gas chromatography mass spectrometry[J]. *Org Geochem*, 2008, 39(4): 440–449.
- [22] 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 肖中尧, 刘长伟. 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): 461–468.

- Wang Fei-yu, Zhang Shui-chang, Zhang Bao-min, Xiao Zhong-yao, Liu Chang-wei. Maturity and its history of Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 2003, 32(5): 461–468 (in Chinese with English abstract).
- [23] 马安来, 金之钧, 张水昌, 王毅. 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 An-lai, Jin Zhi-jun, Zhang Shui-chang, Wang Yi. Molecular geochemical characteristics of Cambrian-Ordovician source rocks in Tarim Basin, NW China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(6): 593–601 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张敏, 黄光辉, 赵红静, 胡国艺. 塔里木盆地海相混源油定量识别模式及其意义[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2007, 29(4): 34–40.
- Zhang Min, Huang Guang-hui, Zhao Hong-jing, Hu Guo-yi. Quantitative identification pattern and its significance of marine mixed oils in Tarim Basin[J]. *J Oil Gas Technol*, 2007, 29(4): 34–40 (in Chinese with English abstract).
- [25] 袁法祥, 孙永革. 英吉苏凹陷原油碳同位素地球化学特征及其地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(3): 324–326.
- Yuan Fa-xiang, Sun Yong-ge. Carbon isotopic geochemistry of crude oil from Yingjisu Sag in Tarim Basin and its implication[J]. *Xinjiang Pet Geol*, 2007, 28(3): 324–326 (in Chinese with English abstract).