

文章编号: 1000-0747(2018)06-1103-12 DOI: 10.11698/PED.2018.06.19

塔里木盆地寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油

包建平, 朱翠山, 王志峰

(长江大学油气资源与勘探技术重点实验室, 地球化学系, 武汉 430100)

基金项目: 国家自然科学基金(41772119, 41272169)

摘要: 依据塔东 2 井和英买力与塔中地区海相原油饱和烃和芳烃馏份的 GC-MS 资料, 重新确立了塔里木盆地寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油。分析结果表明, 塔东 2 井原油富含 3~6 环无烷基取代的多环芳烃, 显示其经历过异常高温的改造; 而完整的正构烷烃系列与 25-降藿烷系列并存表明其是正常油与生物降解油的混源油, 因此不宜作为寒武系烃源岩的端元油。塔中 11 井和塔中 30 井原油特征明显不同于英买 101 井和英买 201 井来源于中—上奥陶统烃源岩的原油, 判断它们应该来源于寒武系一下奥陶统烃源岩, 且这类原油中缺乏 25-降藿烷系列, 表明没有遭受生物降解的改造, 满足端元油的地球化学条件。但值得注意的是两类海相原油中三芳甾烷和甲基三芳甾烷系列分布与组成十分相似, 这与其甾烷和 4-甲基甾烷系列形成了鲜明对照。三芳甲甾烷是塔里木盆地海相油源研究最常使用的一类标志物, 它在塔东 2 井原油和过成熟海相烃源岩与两类成熟端元油中分布特征上的显著差异, 表明它们易受成熟度的影响, 因此在海相原油油源研究中应谨慎使用。图 11 表 4 参 48

关键词: 生物标志物; 三芳甾类; 多环芳烃; 端元油; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Typical end-member oil derived from Lower Ordovician-Cambrian source rocks in the Tarim Basin, NW China

BAO Jianping, ZHU Cuishan, WANG Zhifeng

(Key Laboratory of Oil & Gas Resource and Exploration Technology, Geochemistry Department, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Based on GC-MS data of saturated and aromatic fractions in crude oils from Well TD 2 and the Yingmaili and Tazhong area in the Tarim Basin, the end-member oil derived from Lower Ordovician-Cambrian source rocks was determined. The analytical results show that the crude oil from Well TD2 is rich in 3-6 ring polycyclic aromatic hydrocarbons without alkyl group, suggesting that this oil was altered by an abnormally thermal event. It contains a complete series of normal alkanes and 25-norhopanes, indicating that it is mixed oil of normal oil and biodegraded oil, so it can't be taken as end-member oil derived from Cambrian source rock. The characteristics of crude oils from Well TZ11 and TZ30 are different from the crude oils from Well YM101 and YM201 generated by Middle-Upper Ordovician source rocks, so it is inferred that they are derived from Lower Ordovician-Cambrian source rock. In addition, these crude oils don't contain 25-norhopane series, indicating that they haven't suffered biodegradation, satisfying with geochemical conditions of end-member oil. It is noteworthy that the two kinds of marine oils have similar triaromatic steroids and triaromatic methyl steroids, but different C₂₇₋₂₉ steranes and C₂₈₋₃₀ methyl steranes. Triaromatic dinosteroids are a kind of biomarkers most usually used in marine oil-source correlation in the Tarim Basin, but the big differences in their distributions between crude oil from Well TD 2 and post-mature marine source rocks and two kinds of end-member oils suggest that they are easily affected by thermal maturity and should be cautiously used in marine oil-source correlation.

Key words: biomarkers; triaromatic steroids; polycyclic aromatic hydrocarbons; end-member oil; Tarim Basin

引用: 包建平, 朱翠山, 王志峰. 塔里木盆地寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1103-1114.

BAO Jianping, ZHU Cuishan, WANG Zhifeng. Typical end-member oil derived from Lower Ordovician-Cambrian source rocks in the Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 1103-1114.

0 引言

塔里木盆地是中国最大的含油气叠合盆地, 面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在台盆区发育震旦系—二叠系海相—

海陆交互沉积^[1-3], 在南天山山前的前陆拗陷区发育三叠系—侏罗系湖沼相沉积^[4]。油气勘探实践证明, 台盆区在寒武系一下奥陶统和中—上奥陶统发育 2 套海相烃源岩^[1-3,5], 这 2 套海相烃源岩具有明显不同的分

子地球化学特征^[1-3,5-7],为后续海相原油的油源研究奠定了基础。生物标志物的分布与组成特征对比结果显示,目前台盆区的海相原油大多与中—上奥陶统烃源岩具有较高的相似性、关系较为密切,而少有原油与寒武系—下奥陶统烃源岩间存在较高的相关性,因而认为中—上奥陶统烃源岩是海相原油的主力烃源岩^[8-14]。李素梅等^[15]依据原油单体烃碳同位素组成特征,认为塔里木盆地的海相原油绝大多数为中—上奥陶统烃源岩与寒武系—下奥陶统烃源岩所生原油的混源油。另外一些研究依据原油中芳基类异戊二烯烷烃和硫、碳同位素组成特征认为寒武系—下奥陶统烃源岩是海相原油的主力烃源岩^[16-23]。这3种认识有可能给塔里木盆地带来不同的油气勘探方向。

油源研究最常用的方法是利用原油和烃源岩抽提物中的各类生物标志物来获取有机质来源、沉积环境、成熟度以及次生变化等信息^[24]。但是,塔里木盆地海相原油的油源研究中有2个基本问题没有得到正视:

①塔里木盆地沉积埋藏史决定了寒武系—下奥陶统和中—上奥陶统2套烃源岩经历了完全不同的热演化史。现有分析资料显示寒武系—下奥陶统烃源岩目前已处于高一过成熟阶段,而中—上奥陶统烃源岩目前还处于液态窗范围^[1,3,25]。已有文献报道性质不同的烃源岩在高一过成熟阶段其甾、萜烷标志物的分布与组成会出现明显的趋同现象,导致它们可能不再适于油源对比^[26-28]。塔里木盆地这2套海相烃源岩目前处于截然不同的热演化阶段,因此,其中所含的各类生物标志物的分布与组成特征所提供的地球化学信息能否直接用于油源对比值得关注。

②在混源油研究中,2套烃源岩所生端元油的选择是否具有代表性。由于中—上奥陶统烃源岩目前仍处于液态窗内,演化程度适中,因而能代表这类烃源岩所生原油的端元油,在塔里木盆地不同构造单元较为常

见,容易选择并可以直接进行油源对比。但寒武系—下奥陶统烃源岩演化程度过高,相关端元油的选择较为困难。目前大多数研究工作均以塔东2井寒武系原油作为这一烃源岩的端元油,依此作为标准与库南1井或塔东地区寒武系高一过成熟烃源岩开展油源对比^[29-36],甚至以此原油进行混合配比实验来确定混源油中寒武系烃源岩的贡献^[29]。有研究者对塔东2井原油中生物标志物的分布与组成特征^[33-34]及其成藏历史^[35-37]进行了分析研究,发现该原油在化学组成上较为特殊,并检测出了25-降藿烷系列,说明其曾经历过生物降解和热蚀变作用的改造。这些特征说明塔东2井原油已满足不了作为端元油应该具备的地球化学条件。

塔里木盆地石油地质背景表明,高一过成熟的寒武系—下奥陶统烃源岩与相关成熟原油之间不可能进行直接的油源对比,发现合适的端元油是有效开展寒武系—下奥陶统烃源岩油源对比的关键。本文在对塔东2井原油饱和烃和芳烃馏分烃类的分布与组成分析研究基础上,通过与盆地不同地区不同来源的典型海相原油中甾(包括三芳甾类)、萜烷生物标志物的分布与组成特征的对比研究,厘清塔东2井原油作为寒武系烃源岩端元油存在的问题,明确研究区寒武系—下奥陶统烃源岩在成熟阶段的新端元油及其鉴别依据,并探讨三芳甾类化合物在油源研究中的局限性。

1 样品与实验

1.1 样品来源

原油样品取自塔北隆起西端的英买力地区、塔中地区和塔东地区,其基础地球化学特征见表1。原油物性参数表明塔东2井原油为稠油,而其他原油基本都属于常规原油。英买力地区英买101井和英买201井原油来自于中—上奥陶统烃源岩^[9-10,12-13],其地球化学特征可作为甄别寒武系—下奥陶统烃源岩所生原油的主要依据。

表1 原油样品基础地球化学参数

取样井号	取样深度/m	取样层位	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/(mP·s)	含蜡量/%	含硫量/%	δ ¹³ C/‰
英买101	5 912.50~5 917.00	O	1.14	0.48	0.54					
英买201	5 844.00~5 888.00	O	1.09	0.44	0.46	0.880 6	13.50	10.20	0.64	-33.3
塔中11	4 301.00~4 307.00	S	1.22	0.43	0.49	0.771 3	0.80	1.90	0.12	-31.7
塔中30	4 997.00~5 026.00	O	1.37	0.32	0.31	0.817 5	2.65	9.50	0.35	-32.0
塔东2	4 561.93~5 040.00	ε	1.55	0.45	0.37	1.021 7	2 698.00	10.46	0.51	-28.2

1.2 实验分析

用正己烷沉淀原油样品中的沥青质,然后采用硅胶/氧化铝柱色层法把脱沥青质部分分离成饱和烃、芳香烃和非烃,再对饱和烃馏分和芳烃馏分进行色谱质谱分析。

饱和烃色谱质谱分析条件:分析仪器为 Agilent

6890/5975 台式质谱仪;色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);升温程序为 50 °C 恒温持续 1 min,50~100 °C 的升温速率为 20 °C/min,100~315 °C 的升温速率为 3 °C/min,315 °C 恒温持续 16 min;进样器温度为 300 °C,载气类型为氦气,流

速为 1 mL/min，扫描范围为 50~550 amu；检测方式为全扫描+多离子检测 (MID)，电离能量为 70 eV，离子源温度 230 °C。

芳烃色谱质谱分析条件：分析仪器为 Agilent 6890/5975 台式质谱仪，色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱 (60 m×0.25 mm×0.25 μm)；升温程序为 50 °C 恒温持续 1 min，50~100 °C 的升温速率为 20 °C/min，100~310 °C 的升温速率为 3 °C/min，310 °C 恒温持续 21 min；进样器温度为 290 °C，载气类型为氦气，流速为 1 mL/min，扫描范围为 50~550 amu；检测方式为全扫描+多离子检测 (MID)，电离能量为 70 eV，离子源温度为 230 °C。

2 塔东 2 井原油作为寒武系烃源岩端元油的可行性分析

2.1 饱和烃和芳烃馏分中烃类分布特征

塔东 2 井原油饱和烃和芳烃馏分 GC-MS 分析结果表明，其饱和烃馏分总离子流图的基线较为平直，正构烷烃系列完整且丰度较高，碳数为 nC₁₁—nC₃₇，且姥姘烷 (Pr) 和植烷 (Ph) 的丰度明显低于相邻的正构烷烃 nC₁₇ 和 nC₁₈ (见图 1a)。这一系列现象与塔里木盆地其他海相原油似乎没有明显差异，只是生物标志物浓度相对较高；因为在高相对分子质量部分清楚地呈现出甾、萜类生物标志物的丰度明显高于相应位置的正构烷烃化合物。

值得注意的是其芳烃馏分中 3~6 环的多环芳烃化

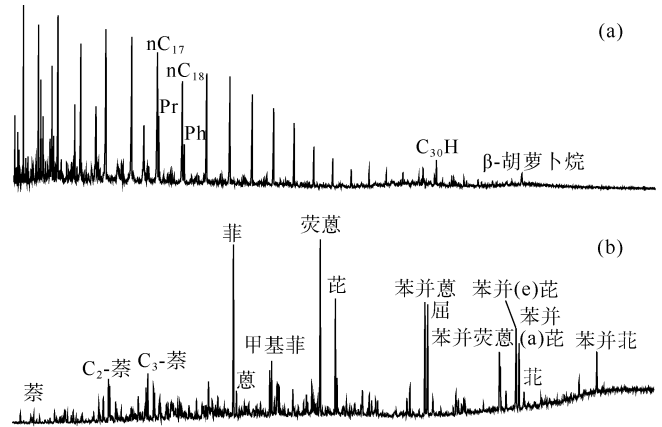


图 1 塔东 2 井原油中饱和烃 (a) 和芳烃 (b) 馏分 GC-MS 总离子流图

合物占绝对优势，且无烷基取代的芳烃化合物占绝对优势 (见图 1b)，而相应稠环芳烃化合物的烷基同系物的含量极低 (见图 2)，这一特征完全不同于塔里木盆地绝大多数海相原油芳烃馏分中烃类的分布与组成特征。因为在常规成熟海相原油中，常规 2~3 环多环芳烃如烷基萘、烷基联苯、烷基菲、烷基芴、烷基二苯并噻吩和烷基二苯并呋喃等是芳烃馏分中的优势组分，4 环以上的稠环芳烃含量很低，它们在总离子流图上基本没有显示^[38]。此外，这些 2~3 环芳烃同系物的相对丰度的变化呈现随烷基侧链碳数的增加而逐渐下降，基本不会出现无烷基取代的芳核占绝对优势的现象，表明塔东 2 井原油经历了不同寻常的后期热蚀变过程；该过程带来的异常高温可能远高于相关烃源岩中有机质在正常埋藏过程中所经历的热演化作用。

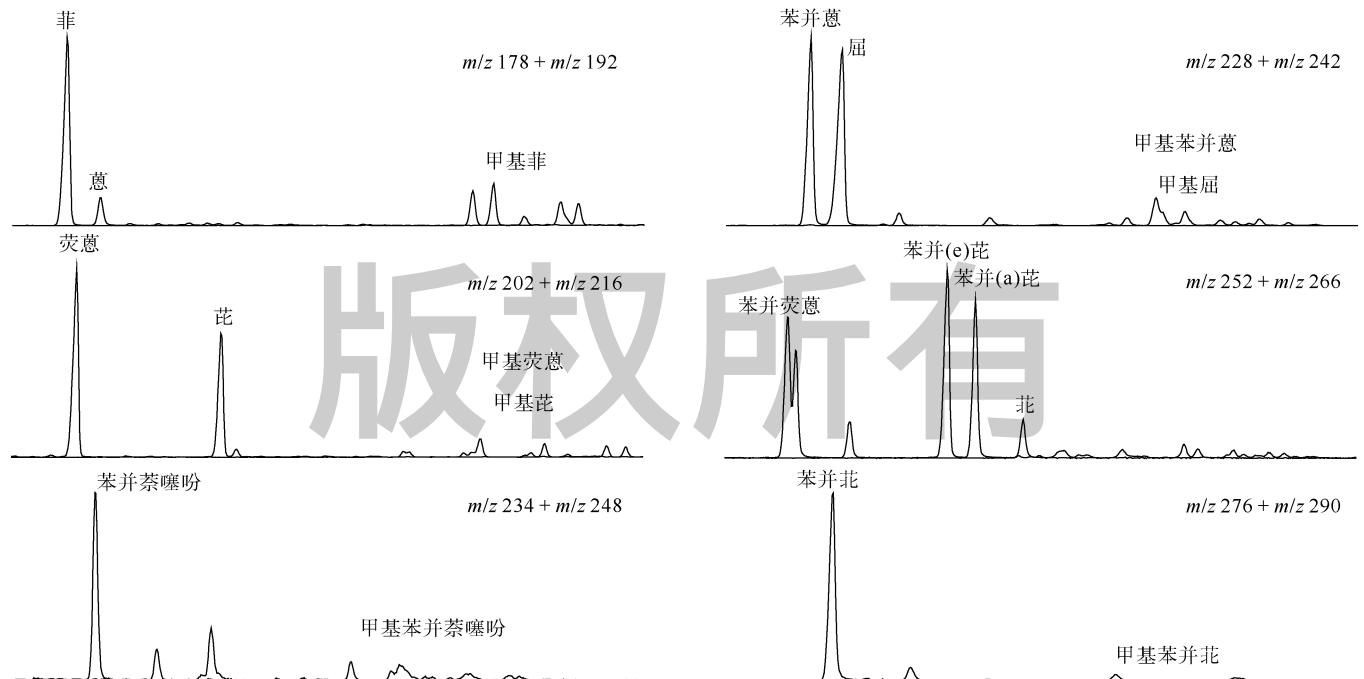


图 2 塔东 2 井原油芳烃组成中 3~6 环稠环芳烃及其甲基同系物的相对分布特征

现有研究表明,现代湖相沉积物的芳烃馏分也具有以无烷基取代的多环芳烃化合物占绝对优势的现象,而且主要出现在表层和浅层沉积中,这一现象随深度的增加而逐渐减弱,其原因是矿物燃料燃烧的产物随雨水和河流进入现代湖盆^[39-40]。显然,燃烧代表着经历高温的烘烤,即高的成熟度。换言之,塔东2井原油芳烃馏分之所以出现如此特殊的分布与组成特征说明其在地质历史时期曾经历过高温烘烤,高温的来源可能与地下热液有关,这与该油藏成藏史得到的认识一致^[35]。由此可见,塔东2井原油并不是一般意义上由烃源岩中的有机质在正常的热演化过程中生成的成熟原油,而是成藏以后经历了强烈异常高温的改造后的产物。因此,把塔东2井原油作为寒武系烃源岩所生端元油对待显然是不妥的,由此得到的认识可能缺乏客观性,甚至可能会起误导作用。

2.2 生物标志物分布与组成特征

原油中甾、萜烷生物标志物的分布与组成特征可

以提供其源岩中生烃母质、形成环境、成熟度及经历过的次生变化等信息,也是开展油源对比的基础。

塔东2井原油中 C_{19-29} 三环萜烷系列呈现以 C_{21} 为主峰的近正态分布(见图3),三环萜烷系列含量中等,其 $C_{21}T/C_{30}H$ 值为0.18,表明其相对丰度明显低于 C_{27-35} 藿烷系列。三环萜烷组成中伽马蜡烷含量中等,伽马蜡烷指数为0.33,指示其烃源岩形成于古盐度相对较高的沉积环境。在甾烷组成中,孕甾烷和升孕甾烷丰度相对较低,其含量相当于 C_{27-29} 甾烷重排甾烷和规则甾烷的5.66%,且 C_{27} 和 C_{29} 重排甾烷与相应碳数规则甾烷的比值分别为0.14和0.17;甾烷碳数组成中 $C_{27}R$ 、 $C_{28}R$ 和 $C_{29}R$ 相对含量分别为26.73%、29.81%和43.46%。显然,塔东2井原油中的甾、萜烷分布与组成与塔里木盆地寒武系烃源岩(如库南1井和塔东2井)的地球化学特征是一致的,这也是人们认为该原油来源于寒武系烃源岩的重要依据^[3,8-10,14]。

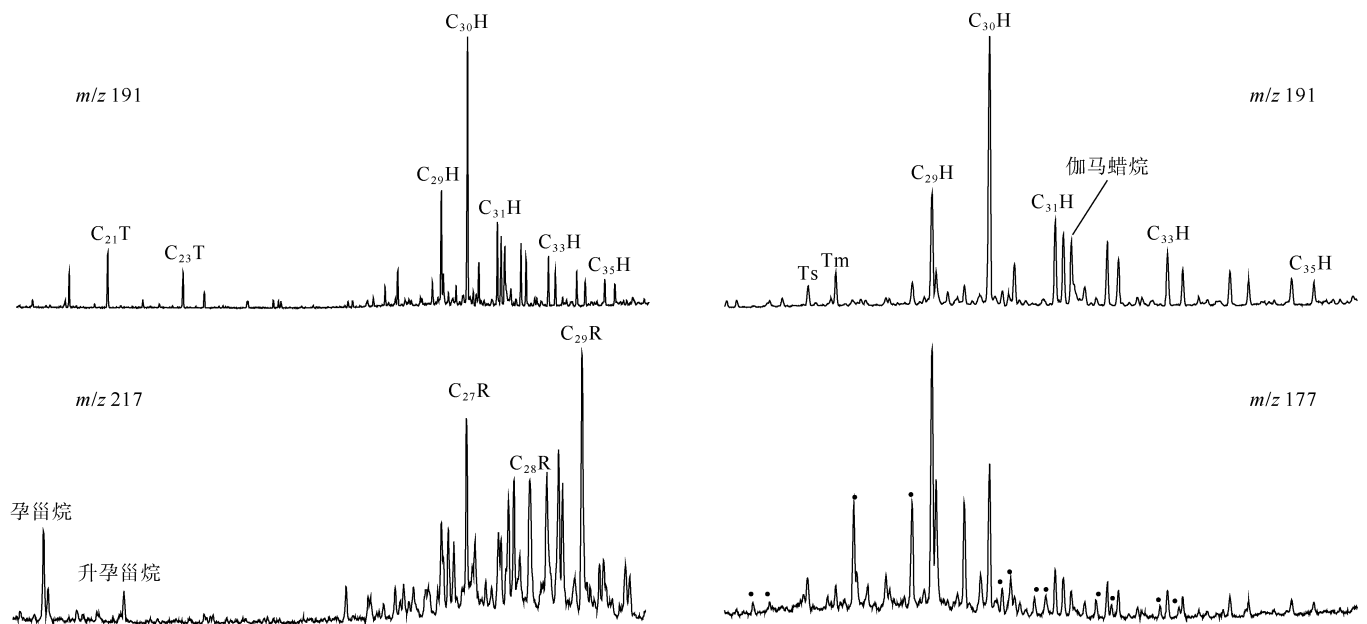


图3 塔东2井原油中甾烷(m/z 217)、三环萜烷系列和三萜烷系列(m/z 191)及25-降藿烷系列(m/z 177)分布特征($C_{21}T$ 和 $C_{23}T$ 代表三环萜烷; $C_{29}H-C_{35}H$ 代表藿烷系列; $C_{27}R$ 、 $C_{28}R$ 、 $C_{29}R$ 分别代表 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 的20R构型甾烷;●代表25-降藿烷系列)

尽管塔东2井原油中存在完整的正构烷烃系列(见图1),但是在该原油中同时检测到了完整且丰度较高的25-降藿烷系列(见图3),这从另一个角度表明塔东2井原油实际上是未遭生物降解原油与严重生物降解原油的混源油。现有的研究表明,原油中正构烷烃系列抗生物降解的能力最弱,在生物降解过程中25-降藿烷系列出现以前它们就会被细菌消耗殆尽^[24]。换言之,正常情况下正构烷烃系列和25-降藿烷系列是不会同时出现在同一原油中的。当一个油藏前期发生抬

升遭受降解破坏,后期又发生沉降接受油气的二次充注时就会出现这两类化合物同时并存的特殊现象;此时油藏中的原油就不是单一来源的原油,而可能是来源相同但成熟度不同的原油的混源油,或者就是不同来源原油的混源油。显然,混源油是不能作为端元油的。就塔东2井原油而言,其中早期的生物降解原油应该来源于寒武系烃源岩,而晚期的常规原油既可能是生物降解原油遭受异常高温作用的产物,也可能是寒武系烃源岩在高温演化阶段的产物。

塔东 2 井原油芳烃馏分的烃类组成表明其曾遭受过强烈热蚀变的改造,饱和烃馏分中不同生物标志物的组合特征显示油藏曾发生过二次油气充注,呈现严重生物降解油与未降解常规油混源的现象。因此,无论是从成熟度的角度还是从油气成藏历史的角度判断,该原油不具备作为端元油的基本地球化学条件。那么,在塔里木盆地是否存在来源于寒武系一下奥陶统烃源岩的原生端元油呢?

3 寒武系一下奥陶统烃源岩端元油

3.1 饱和烃和芳烃馏分中烃类分布与组成特征

以往的研究结果认为,英买力地区的英买 101 井和英买 201 井奥陶系储集层所产原油主要来源于中—上奥陶统烃源岩^[9-13,30]。塔中地区的塔中 11 井志留系储集层和塔中 30 井奥陶系储集层所产原油尽管已被一些研究者作为研究对象进行了分析^[15-16,31],但对其成因和来源及其石油地质意义并没有得到足够关注。

上述 4 个原油样品中饱和烃馏分 GC-MS 的总离子流图显示(见图 4),它们的正构烷烃系列呈现前主峰的单峰型分布,高碳数部分明显偏低,这与早古生代形成的海相烃源岩中原始生烃母质主要来源于浮游藻类的背景是一致的,同时表明这些原油属于成熟原油。姥植均势是这些原油的共同特征,姥鲨烷和植烷与相邻正构烷烃(nC_{17} 和 nC_{18})的相对组成十分接近(见表 1),这也是塔里木盆地海相原油的基本特征。然而,值得注意的是塔中 11 井和塔中 30 井原油饱和烃馏分总离子流图中高相对分子质量部分显示高丰度的甾、萜烷化合物和 β -胡萝卜素,这一特征与塔东 2 井原油是可比的,而英买 101 井和英买 201 井原油则不具有这一特征,这可能暗示它们在成因和来源上是存在差异的。

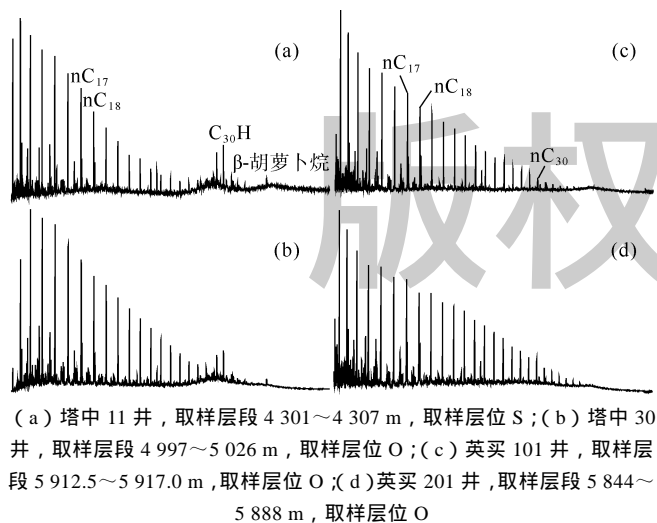


图 4 4 个原油样品饱和烃馏分 GC-MS 总离子流图

本文所研究原油芳烃馏分的烃类分布特征十分相似,主要表现为烷基萘和烷基菲等 2~3 环的常规芳烃化合物是其优势组分,而 4~6 环的稠环芳烃在其芳烃馏分总离子流图上基本缺失(见图 5),这些特征与塔东 2 井原油芳烃馏分的烃类组成构成鲜明对照,同时也表明后期的异常热蚀变对原油芳烃馏分的影响十分显著。换言之,沉积有机质在正常热演化过程中形成的芳烃化合物主要以常规中、低环的多环芳烃为主,而且不同系列芳烃化合物相对丰度的变化呈现随环数的增加而降低,这也是常规成熟海相原油芳烃馏分的烃类基本组成特征。塔东 2 井原油因经历异常热蚀变的改造而不具备这一特征,这也是它不能作为寒武系烃源岩端元油的重要原因。由此可见,原油芳烃馏分的烃类组成也可以提供重要的地球化学信息反映其所经历的地质-地球化学过程。

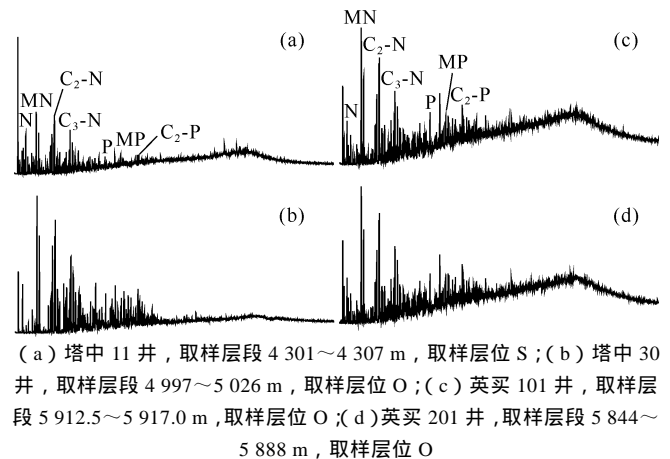


图 5 4 个原油样品芳烃馏分 GC-MS 总离子流图

3.2 甾、萜烷分布与组成

分析结果表明塔中 11 井和塔中 30 井原油与英买 101 井和英买 201 井原油在甾、萜烷分布特征上的差异性明显大于相似性,这充分表明它们在油源和成因上是存在明显差异的。它们之间的相似性主要体现在其 C_{19-26} 三环萜烷系列均呈以 C_{23} 为主峰的近正态分布(见图 6),显示出海相原油的特征。但塔中 11 井和塔中 30 井原油中三环萜烷系列的相对丰度明显低于英买 101 和英买 201 井原油,前者 $C_{23}T/C_{30}H$ 值小于 0.1,而后者该比值则达到 0.5。此外,塔中 11 井和塔中 30 井原油中 C_{24} 四环萜烷($C_{24}TE$)的丰度与相邻的 C_{26} 三环萜烷($C_{26}T$)的丰度相当, $C_{24}TE/C_{26}T$ 值约为 0.5~0.6;而英买 101 井和英买 201 井原油中 $C_{24}TE$ 的丰度明显高于 $C_{26}T$,二者比值接近 1.0。在三萜烷分布特征上,塔中 11 井和 TZ30 井原油主要表现为 C_{29} 降

藿烷 ($C_{29}H$) 的丰度明显低于 C_{30} 藿烷 ($C_{30}H$), 且具有较高含量的伽马蜡烷 (见图 6), 其 $C_{29}H/C_{30}H$ 值约为 0.4, 伽马蜡烷指数为 0.3~0.4; 但英买 101 井和英买 201 井原油中的特征则恰好相反, $C_{29}H$ 的丰度略低于 $C_{30}H$, 伽马蜡烷含量很低, $C_{29}H/C_{30}H$ 值约为 0.85,

伽马蜡烷指数约为 0.1 (见表 2), 这与中—上奥陶统烃源岩中的藜烷特征是相似的, 因而认为它们应该来源于这套烃源岩^[14-16,31]。据此可以认为塔中 11 井和塔中 30 井原油的来源应该不同于英买 101 井和英买 201 井原油。

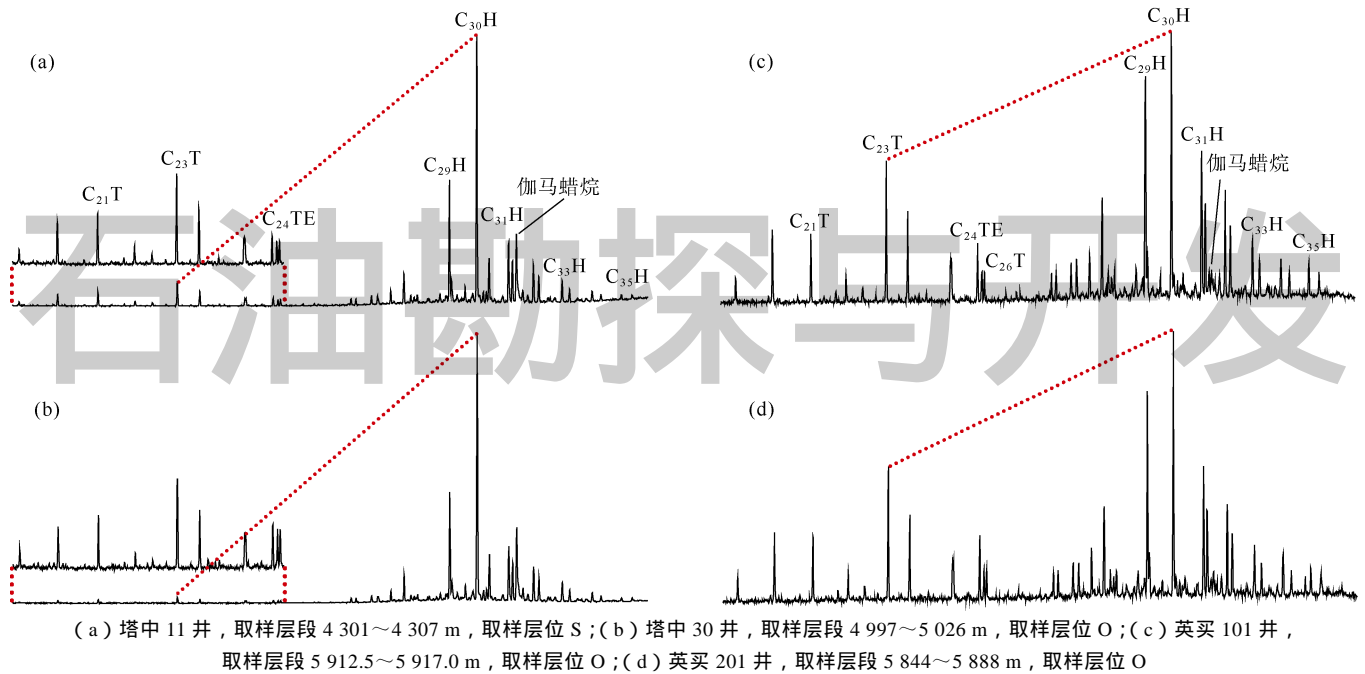


图 6 4 个原油样品中藜烷类标志物分布特征 (m/z 191)

表 2 塔里木盆地不同海相原油样品藜烷类参数表

取样井号	取样深度/m	取样层位	Ts/Tm	伽马蜡烷指数	$C_{24}TE/C_{26}T$	$C_{29}H/C_{30}H$	$C_{23}T/C_{30}H$
英买 101	5 912.50~5 917.00	O	0.44	0.13	0.93	0.83	0.49
英买 201	5 844.00~5 888.00	O	0.49	0.09	0.96	0.85	0.51
塔中 11	4 301.00~4 307.00	S	0.41	0.36	0.64	0.43	0.08
塔中 30	4 997.00~5 026.00	O	0.39	0.38	0.53	0.38	0.02
塔东 2	4 561.93~5 040.00	€	0.58	0.33	0.58	0.43	0.12

不同原油中甾烷系列分布特征上的差异是显而易见的 (见图 7), 如塔中 11 井和塔中 30 井原油中孕甾烷和升孕甾烷含量很低, 这类低相对分子质量甾烷的相对含量仅相当于 C_{27-29} 甾烷的 0.5%~3.5%, 且重排甾烷含量很低, 其 C_{27} 和 C_{29} 重排甾烷 ($diaC_{27}$ 和 $diaC_{29}$) 与相应碳数规则甾烷 (reC_{27} 和 reC_{29}) 的比值基本都小于 0.1 (见表 3), C_{28} 甾烷丰度较高, 其相对丰度多呈现出 $C_{29}R>C_{28}R>C_{27}R$ 的反“L”型。与此形成对照的是英买 101 井和英买 201 井原油明显富含孕甾烷和升孕甾烷, 其相对含量相当于 C_{27-29} 甾烷的 10%~12%, 且具有中等含量的重排甾烷, 其 C_{27} 和 C_{29} 重排甾烷与相应碳数规则甾烷的比值分别为 0.25~0.30 和 0.35~0.45 (见表 3), C_{28} 甾烷的丰度明显偏低, 其相对丰度呈现出 $C_{29}R>C_{27}R>C_{28}R$ 的不对称“V”型分布, 这一

系列特征与塔里木盆地中—上奥陶统烃源岩中的甾烷系列具有较好的可比性^[14-16,31], 这也是把它们归因于这套烃源岩的重要依据, 同时也反证了塔中 11 井和塔中 30 井原油具有不同的来源。

m/z 231 质量色谱图清楚地表明英买 101 井和英买 201 井原油与塔中 11 井和塔中 30 井原油均存在 C_{28-30} 的 4-甲基甾烷系列, 不同的是前者仅能检测到 C_{28-30} 的 4-甲基甾烷系列, 而后者还存在较丰富的 C_{30} 甲藻甾烷 (见图 8)。尽管 4-甲基甾烷和甲藻甾烷一般被笼统地认为代表沟鞭藻或甲藻的生源输入, 但 4-甲基-24-乙基胆甾烷可能来源于定鞭金藻中的 4-甲基-24-乙基胆甾醇, 且它对甲藻的专属性较弱, 而甲藻甾烷无疑代表了甲藻的贡献^[41-42]。显然, 研究区不同原油在 4-甲基甾烷分布与组成上的差异是它们具有不同来源的客观反映。

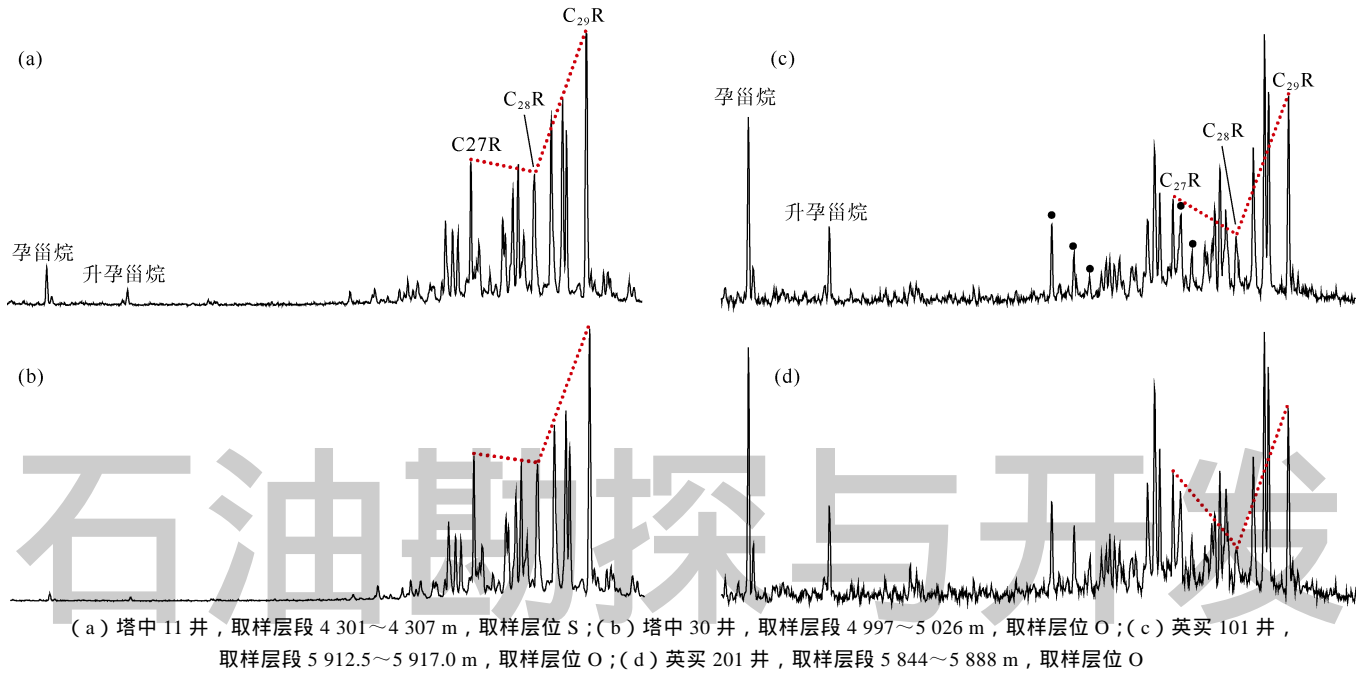


图 7 4 个原油样品中甾烷系列分布特征 (m/z 217)

表 3 塔里木盆地不同海相原油样品甾烷参数表

取样井号	取样深度/m	取样层位	C ₂₇ R/%	C ₂₈ R/%	C ₂₉ R/%	diaC ₂₇ /reC ₂₇	diaC ₂₉ /reC ₂₉	C ₂₁₊₂₂ /C ₂₇₋₂₉
英买 101	5 912.50~5 917.00	O	29.4	26.3	44.3	0.25	0.35	9.92
英买 201	5 844.00~5 888.00	O	34.1	21.9	44.1	0.31	0.45	11.59
塔中 11	4 301.00~4 307.00	S	20.5	31.9	47.6	0.07	0.11	2.40
塔中 30	4 997.00~5 026.00	O	19.9	33.4	46.7	0.03	0.10	0.55
塔东 2	4 561.93~5 040.00	-e	26.7	29.8	43.5	0.14	0.17	5.66

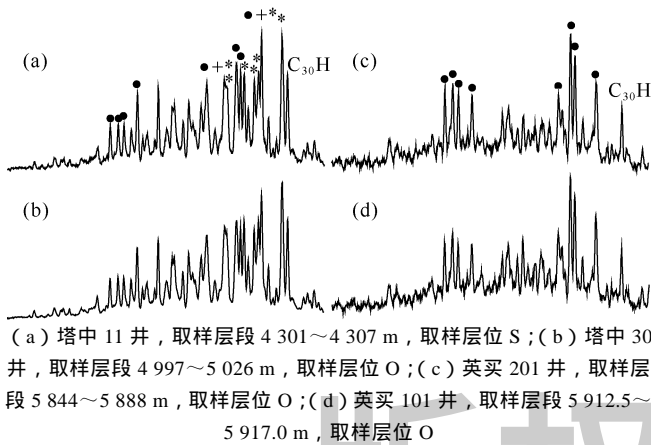


图 8 4 个原油样品中 4-甲基甾烷系列分布特征 (m/z 231; +代表 C₂₈₋₃₀ 的 4-甲基甾烷系列; *代表 C₃₀ 甲藻甾烷)

一个值得注意的现象是塔中 11 井和塔中 30 井原油较英买 101 井和英买 201 井原油具有明显偏低的三环萜烷系列和低相对分子质量甾烷系列 (见图 6、图 7)。已有研究成果表明, 地质样品中这些低相对分子质量标志物的相对含量会随着成熟度的升高而增加, 如一些高一过成熟烃源岩和古油藏焦沥青中此类化合物的含量一般较为丰富^[26-28], 那么导致本文所研究原油中

此类标志物的丰度出现如此差异的原因是它们的成熟度存在显著差异吗? 答案似乎是否定的, 因为它们的三萜烷成熟度参数 Ts/Tm 值十分接近, 约为 0.4 (见表 2), 而 C₂₉ 甾烷 20S/(20S+20R) 值为 0.45~0.52, 由此表明它们的成熟度应该是相近的。换言之, 导致原油在低相对分子质量甾、萜烷相对含量上出现显著差异的原因不是成熟度, 而是它们具有不同的来源。此外, 原油中 C₂₇₋₂₉ 甾烷系列和 C₂₇₋₃₅ 藿烷系列绝对浓度的分析结果显示塔中 11 井和塔中 30 井原油中的浓度相当于英买 101 井和英买 201 井原油中浓度的 4~5 倍, 进一步证明它们应该具有各自独立的油源。

综合塔中 11 井和塔中 30 井原油与英买 101 井和英买 201 井原油中甾、萜烷系列的分布与组成特征, 再结合研究区 2 套海相主力烃源岩中生物标志物地球化学特征的研究成果^[8-14], 可以判断塔中 11 井和塔中 30 井原油应该来源于寒武系一下奥陶统烃源岩。

塔中 11 井和塔中 30 井来源于寒武系一下奥陶统烃源岩的原油能否成为端元油的前提是它们的原生性问题, 即是否遭受过后期生物降解作用的改造。两个原油的 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图清楚地显示其中

均没有检测出 25-降藿烷系列(见图 9),由此证明它们没有遭受生物降解作用的改造,具有原生性,可以作为塔里木盆地寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油。这

一认识为研究区海相原油的油源对比提供了对比参考,同时可以弥补因缺乏成熟度适中的寒武系一下奥陶统烃源岩给油源研究带来的不便。

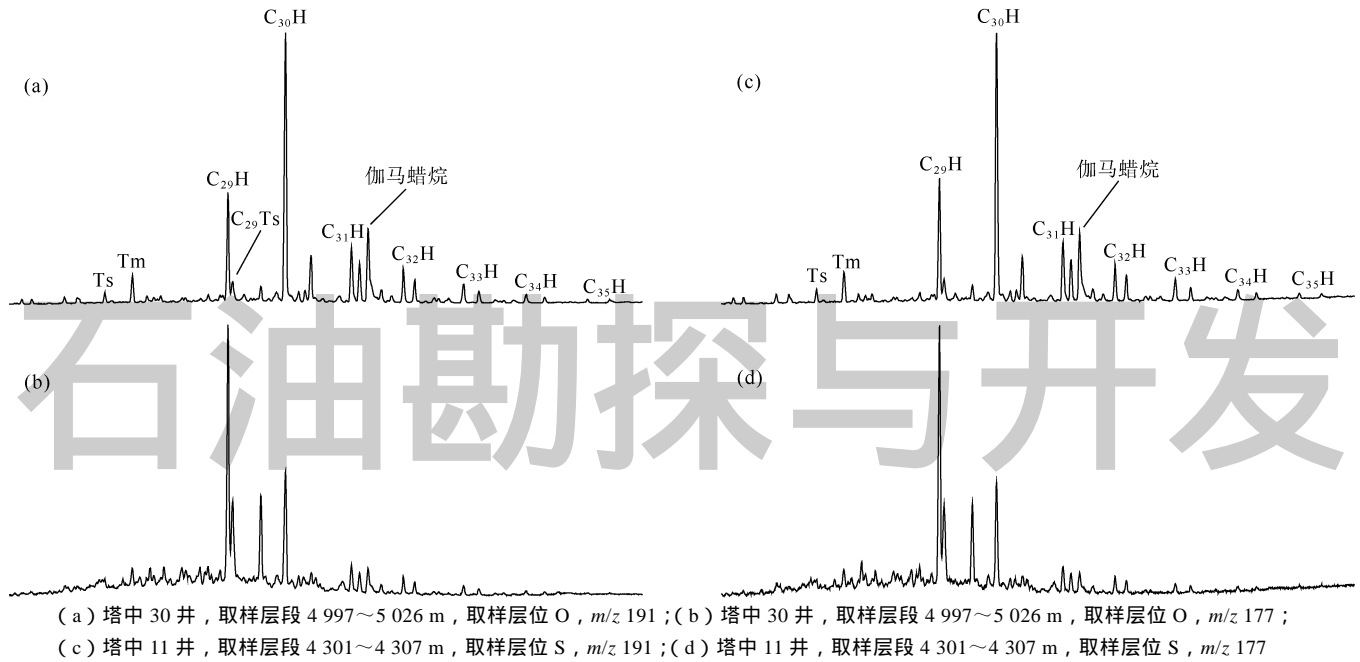


图 9 塔中 30 井和塔中 11 井原油中 m/z 191 与 m/z 177 质量色谱图

尽管塔中 11 井和塔中 30 井原油可以作为塔里木盆地寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油,但端元油的地球化学特征会随烃源岩的形成环境、沉积水体的水化学条件和生物来源等的不同而发生变化。换言之,对于面积为 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的塔里木盆地而言,可以预料任何 1 个层系的烃源岩其端元油应该不止 1 个,这一点尤其重要。朱心健等^[43]的研究发现塔里木盆地寒武系烃源岩中干酪根的碳同位素组成存在轻 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-36\text{‰} \sim -34\text{‰}$) 重 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-30\text{‰} \sim -27\text{‰}$) 两组,分别对应下寒武统和中—上奥陶统烃源岩,而偏重的那一组与中—上奥陶统烃源岩中干酪根碳同位素组成值一致,由此表明寒武系烃源岩的地球化学特征也存在多样性,这也是塔里木盆地寒武系烃源岩可以形成不止一个具有不同地球化学特征端元油的最好例证。

4 三芳甾类标志物在油源研究中的局限性

在塔里木盆地海相原油的油源研究中,人们特别关注原油和烃源岩中三芳甾类化合物的分布与组成特征,并把它们作为区分寒武系一下奥陶统烃源岩和中—上奥陶统烃源岩所生原油的主要鉴定依据^[3,33-42,44-45]。梁狄刚等^[26]认为三芳甾烷系列表现出既能指示不同层系、不

同岩性(沉积环境)的生源特征,又不受成熟度影响的“指纹”作用,很有希望成为高一过成熟区油源对比的有效指标。但是,塔里木盆地不同来源海相原油所呈现出来的特征似乎并非如此简单,而且不能忽略成熟度的变化对三芳甾类化合物的分布与组成特征的影响。

如前所述,来源于寒武系一下奥陶统烃源岩的塔中 11 井和塔中 30 井原油与来源于中—上奥陶统烃源岩的英买 101 井和英买 201 井原油具有明显不同的 C_{27-29} 甾烷系列 (m/z 217) 和 C_{28-30} 甲基甾烷系列 (m/z 231) 分布与组成特征(见图 7、图 8),但出乎意料的是它们的 C_{26-28} 三芳甾烷系列 (m/z 231) 和 C_{27-29} 甲基三芳甾烷系列 (m/z 245) 的分布特征则十分相似。

本文所研究不同来源海相端元油中的三芳甾烷系列均呈现 C_{28} 三芳甾烷的绝对优势,而 C_{26} 和 C_{27} 三芳甾烷的丰度明显偏低(见图 10)。计算结果表明,来源于寒武系烃源岩的原油和来源于中—上奥陶统烃源岩的原油其三芳甾烷系列的碳数组成几乎完全一致,这与其 C_{27-29} 规则甾烷的碳数组成形成了鲜明的对照(见表 4)。这一现象表明处于相近演化阶段的同一地质样品中的 C_{27-29} 规则甾烷系列与相应的 C_{26-28} 三芳甾烷系列的碳数组成之间可能并不存在对应关系,或者说在芳构化过程中,生物体内不同碳数的甾类前身物如

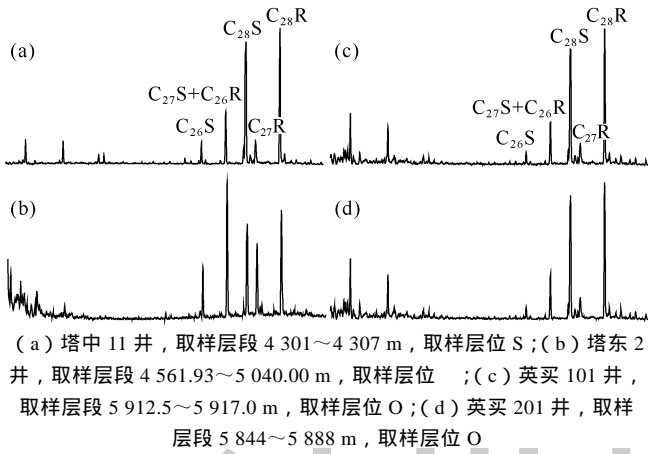


图 10 塔里木盆地不同来源海相原油中三芳甾烷系列的分布特征

表 4 塔里木盆地不同海相原油样品 C₂₇₋₂₉ 规则甾烷和 C₂₆₋₂₈ 三芳甾烷碳数组成对比表

取样井号	取样深度/m	取样层位	C ₂₆₋₂₈ 三芳甾烷		C ₂₇₋₂₉ 规则甾烷	
			C ₂₆ /C ₂₈	C ₂₇ /C ₂₈	C ₂₇ /C ₂₉	C ₂₈ /C ₂₉
英买 101	5 912.50~5 917.00	O	0.03	0.21	0.55	0.47
英买 201	5 844.00~5 888.00	O	0.04	0.21	0.68	0.39
塔中 11	4 301.00~4 307.00	S	0.05	0.23	0.33	0.58
塔中 30	4 997.00~5 026.00	O	0.06	0.36	0.38	0.62
塔东 2	4 561.93~5 040.00	€	0.21	0.73	0.55	0.67

甾醇或甾酮并不是同等程度地转变成相应碳数的三芳甾类化合物。因此，利用三芳甾烷系列的分布与组成特征进行油源研究时需要谨慎。

在塔里木盆地海相原油的油源研究中，甲基三芳甾烷系列是一类应用最广的生物标志物，主要关注的是其中三芳甲藻甾烷的相对含量^[3,8-16,33-36,44-45]。本文研究的不同来源海相端元油中，甲基三芳甾烷系列的分布特征十分相近，均表现为以 C₂₇₋₂₉ 甲基三芳甾烷为主，三芳甲藻甾烷的丰度极低或基本没有（见图 11），这与它们的饱和烃馏分中甲基甾烷系列的分布特征完全不同，因为塔中 11 井和塔中 30 井寒武系一下奥陶统烃源岩的端元油中明显富含甲藻甾烷，但其芳烃馏分中并没有检测到相应丰度的三芳甲藻甾烷。换言之，同一样品中甲藻甾烷与三芳甲藻甾烷之间在相对丰度上没有出现预期的对应关系。这一现象对于原本就缺乏甲藻甾烷的中—上奥陶统烃源岩的端元油比较容易理解，但对来源于寒武系一下奥陶统烃源岩且富含甲藻甾烷的端元油似乎就难以理解了。显然，把三芳甲藻甾烷的相对丰度作为区分或鉴别塔里木盆地两类海相原油的主要依据是值得商榷的。

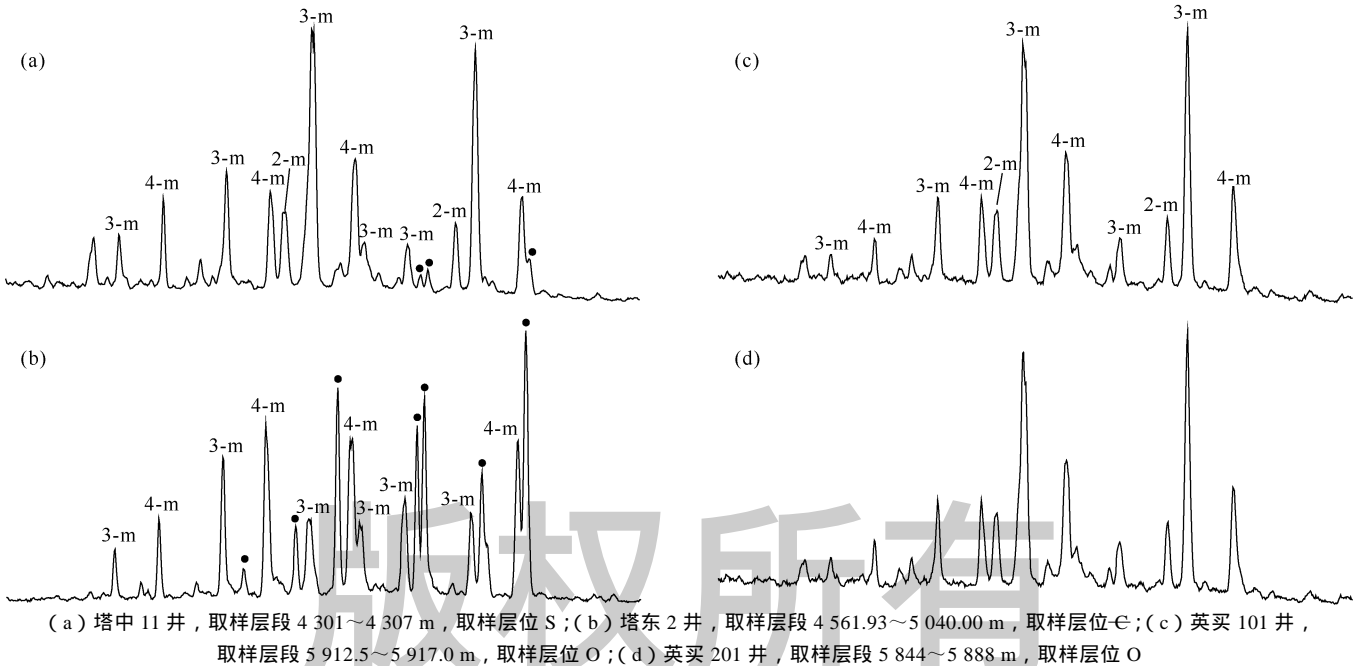


图 11 塔里木盆地不同来源海相原油中甲基三芳甾烷系列的分布特征

如前所述，塔东 2 井原油是经历过异常热蚀变改造的混源油，张水昌等^[35]的研究结果表明其经历的古地温为 200~210 °C，具有较高的成熟度，这与其芳烃馏分中烃类的组成特征吻合（见图 1）。但值得注意的是，该原油的三芳甾烷系列和甲基三芳甾烷系列的分

布与组成特征与塔中 11 井和塔中 30 井端元油存在明显差异，主要表现为 C₂₆、C₂₇、C₂₈ 三芳甾烷的碳数组成与 C₂₇₋₂₉ 规则甾烷的碳数组成较为接近（见图 10、表 4），C₂₉ 三芳甲藻甾烷相对丰富（见图 11），这些特征与目前处于高一过成熟阶段的寒武系烃源岩中同类

标志物的分布特征十分接近,这也是目前把此类原油当作寒武系烃源岩端元油的依据所在。由于塔东2井原油经历过异常高温的改造,成熟度应该高于一般成熟原油,这一特征恰好与处于高一过成熟阶段的寒武系烃源岩相互匹配,这也可能是它与塔里木盆地高热演化寒武系烃源岩在 C_{26-28} 三芳甾烷和 C_{27-29} 甲基三芳甾烷存在可比性的原因所在。无独有偶,文献资料显示黔北地区上古生界煤系源岩成因的古油藏(小草坝古油藏固体沥青的 ^{13}C 值大于 -26%)和下寒武统海相源岩成因的古油藏(岩孔古油藏固体沥青的 ^{13}C 值小于 -32%)中的焦沥青具有分布特征相似的 C_{26-28} 三芳甾烷和 C_{27-29} 甲基三芳甾烷系列,尤其是二者均富含所谓的三芳甲藻甾烷^[29]。这一现象也清楚地表明地质样品中甲基三芳甾烷的分布与组成特征已不能提供可靠的生源信息。

由此可见,不同成因类型的原油可以出现分布和组成特征相似的 C_{26-28} 三芳甾烷和 C_{27-29} 甲基三芳甾烷系列,而处于高热演化阶段地质样品的芳烃馏分中检测到的丰富三芳甲藻甾烷可能与有机质来源无关,而只是高热演化的产物。因此,在利用三芳甾类化合物的分布与组成特征进行油源研究时需十分谨慎,因为它提供的地球化学信息可能是相互矛盾的。此外,油源对比所选用的地质样品应处于相近的热演化阶段,只有这样才能尽可能地保证结论的客观可靠,因为热演化作用对各类分子化合物的分布与组成的影响远超人们的想象。

地质体中的甾类标志物包括甾烯类、甾烷类和芳香甾类,都来源于生物体中甾烷醇或甾烯醇等甾醇类化合物成岩演化和热演化的产物^[46]。目前对地质体中三芳甾类化合物的研究程度远低于甾烷类化合物,只是笼统地认为它们是生物体内的甾醇类化合物经过脱官能团和脱氢作用形成单芳甾烷,如果进一步发生芳构化作用则形成三芳甾烷,鲜有文献涉及同一样品中甾烷碳数组成与三芳甾烷碳数组成之间对应关系的研究。因而此类标志物的应用领域在国外主要集中在成熟度研究上^[47-48],而国内则将其延伸、扩展到塔里木盆地海相原油的油源研究中^[3,8-16,33-36,44-45]。本文样品的分析结果显示不同成因类型的海相原油可以具有相似的三芳甾烷和甲基三芳甾烷分布与组成特征,在应用于油源研究时应小心谨慎。

5 结论

塔东2井原油可能主要来源于寒武系烃源岩,但

其芳烃馏分中异常丰富的无烷基取代3~6环多环芳烃,及完整的正构烷烃系列与25-降藿烷系列并存等现象,表明它是一类经历异常高温改造的生物降解原油与正常原油的混源油,因而不能作为塔里木盆地寒武系烃源岩的端元油。

成熟度适中的塔中11井和塔中30井与已知来源于中—上奥陶统烃源岩的英买101井和英买201井原油具有截然不同的生物标志物分布与组成特征,它们是2类具有不同来源的海相原油。塔中11井和塔中30井原油中没有检测到25-降藿烷系列,表明它们没有遭受生物降解作用的改造,属于原生成熟原油,可以作为寒武系—下奥陶统烃源岩的端元油。

不同成因和来源的海相原油具有相似的三芳甾烷和甲基三芳甾烷分布与组成,呈现 C_{28} 三芳甾烷占绝对优势和贫三芳甲藻甾烷,而经历异常高温改造的塔东2井高成熟混源油中 C_{26} 和 C_{27} 三芳甾烷丰度较高,且三芳甲藻甾烷丰富,这一系列现象表明这类生物标志物的分布与组成特征易受成熟度的影响,在油源研究中应该谨慎使用。

参考文献:

- [1] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等.从塔里木盆地看中国海相生油问题[J].地学前缘,2000,7(4):534-547.
LIANG Digang, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 534-547.
- [2] 云金表,金之钧,解国军.塔里木盆地下古生界主力烃源岩分布[J].石油与天然气地质,2014,35(6):827-838.
YUN Jinbiao, JIN Zhijun, XIE Guojun. Distribution of major hydrocarbon source rocks in the Lower Palaeozoic, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 827-838.
- [3] 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.
ZHANG Shuichang, LIANG Digang, ZHANG Baomin, et al. Marine petroleum formation in Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [4] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等.塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M].北京:石油工业出版社,2004.
LIANG Digang, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Non-marine petroleum formation in the Kuqa Depression of Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [5] 朱光有,陈斐然,陈志勇,等.塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J].天然气地球科学,2016,27(1):8-21.
ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 8-21.
- [6] 朱俊章,包建平.塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩地球化

- 学特征[J]. 海相油气地质, 2000, 5(3): 55-59.
- ZHU Junzhang, BAO Jianping. Geochemical characteristics of Cambrian-Ordovician marine source rocks in the Tarim Basin[J]. Marine Oil & Gas Geology, 2000, 5(3): 55-59.
- [7] 边立曾, 张水昌, 张宝民, 等. 似球状沟鞭藻化石重新解释早、中寒武世甲藻甾烷的来源[J]. 科学通报, 2000, 45(23): 2554-2558.
- BIAN Lizeng, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. A kind of coccoid diaoflagellates-like fossils gives a new explanation of source of dinosteranes in the early-middle Cambrian[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(23): 2554-2558.
- [8] 王招明, 肖中尧. 塔里木盆地海相原油的油源问题的综合述评[J]. 科学通报, 2004, 49(S1): 1-8.
- WANG Zhaoming, XIAO Zhongyao. Reviews on sources of marine oils in the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(S1): 1-8.
- [9] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 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, et al. Molecular fossils and oil-source correlations in Tarim Basin, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 16-23.
- [10] ZHANG S C, HANSON A D, MOLDOWAN J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(4): 273-286.
- [11] HANSON A D, ZHANG S C, MOLDOWAN J M. Molecular organic geochemistry of the Tarim Basin, northwest China[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1109-1128.
- [12] 张水昌, 张宝民, 王飞宇, 等. 中—上奥陶统: 塔里木盆地的主要油源层[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1): 16-22.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, WANG Feiyu, et al. Middle-Upper Ordovician: The main source of the oils in the Tarim Basin[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2000, 5(1): 16-22.
- [13] 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. Upper-Middle Ordovician source rocks geochemistry of the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 23-28.
- [14] 杨福林, 云露, 王铁冠, 等. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 851-861.
- YANG Fulin, YUN Lu, WANG Tieguan, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin and oil-source correlation with typical marine crude oil[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 851-861.
- [15] 李素梅, 庞雄奇, 杨海军, 等. 塔里木盆地海相油气源与混源成藏模式[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(4): 663-672.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, YANG Haijun, et al. Generation, migration and accumulation model for the marine oils in the Tarim Basin[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(4): 663-672.
- [16] LI S M, AMRANI A, PANG X Q, et al. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Organic Geochemistry, 2015, 78: 1-22.
- [17] 孙永革, 肖中尧, 徐世平, 等. 塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯的检出及其地质意义[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 215-218.
- SUN Yongge, XIAO Zhongyao, XU Shiping, et al. Aryl isoprenoids in crude oil and its implication in geological exploration[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(2): 215-218.
- [18] SUN Y G, XU S P, LU H, et al. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim Basin, NW China: Implications from aryl isoprenoids in crude oils[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(4): 629-634.
- [19] CAI C F, LI K K, MA A L, et al. Distinguishing Cambrian from Upper Ordovician source rocks: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers in the Tarim Basin[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(7): 755-768.
- [20] CAI C F, ZHANG C M, RICHARD H W, et al. Application of sulfur and carbon isotopes to oil-source rock correlation: A case study from the Tazhong area, Tarim Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2015, 83: 140-152.
- [21] 杜金虎, 潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 327-339.
- DU Jinhui, PAN Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 327-339.
- [22] 郑冰, 高仁祥. 塔里木盆地原油碳硫同位素特征及油源对比[J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 281-285.
- ZHENG Bing, GAO Renxiang. Characteristics of carbon and sulfur isotopes in crude oils and oil-source correlation in the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 281-285.
- [23] 张纪智, 王招明, 杨海军, 等. 塔里木盆地中深地区寒武系盐下白云岩油气来源及差异聚集[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 40-47.
- ZHANG Jizhi, WANG Zhaoming, YANG Haijun, et al. Origin and differential accumulation of hydrocarbons in Cambrian sub-salt dolomite reservoirs in Zhongshen Area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 40-47.
- [24] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. 生物标志物指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The Biomarkers Guide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [25] 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): 461-468.
- WANG Feiyu, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Maturity and its history of Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin[J]. Geochimica, 2003, 32(5): 461-468.
- [26] 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 8-14.
- LIANG Digang, CHEN Jianping. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 8-14.
- [27] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 35-44.
- ZHU Yangming, GU Shengxiao, LI Ying, et al. Biological organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan basin[J]. Geochimica, 2012, 41(1): 35-44.

- [28] 包建平, 斯春松, 蒋兴起, 等. 黔北坳陷小草坝古油藏储层沥青来源与成因研究[J]. 地球化学, 2016, 45(3): 315-328.
BAO Jianping, SI Chunsong, JIANG Xingchao, et al. Study on origin and source of solid bitumen from the Xiaocaoba Paleo-reservoir in the Northern Guizhou Depression[J]. *Geochimica*, 2016, 45(3): 315-328.
- [29] 朱光有, 崔洁, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔北地区具有寒武系特征原油的分布及其成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2435-2446.
ZHU Guangyou, CUI Jie, YANG Haijun, et al. The distribution and origin of Cambrian crude oil in North Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2435-2446.
- [30] 金之钧, 刘全有, 云金表, 等. 塔里木盆地环满加尔凹陷油气来源与勘探方向[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(3): 310-320.
JIN Zhijun, LIU Quanyou, YUN Jinbiao, et al. Potential petroleum sources and exploration directions around the Manjar Sag in the Tarim Basin[J]. *SCIENCE CHINA: Earth Sciences*, 2017, 60(2): 235-245.
- [31] ZHANG S C, HUANG H P. Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 1. Oil family classification[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 30: 1204-1214.
- [32] LI S M, PANG X Q, JIN Z J, et al. Petroleum source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin: New insights from geochemical and fluid inclusion data[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41: 531-553.
- [33] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 塔里木盆地塔东 2 井稠油地球化学研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 59-63.
MA Anlai, ZHANG Shuichang, ZHANG Dajiang, et al. Geochemistry of the heavy oils from well TD2 in Tarim basin, NW China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 59-63.
- [34] 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等. 塔里木盆地塔东 2 井原油成因分析[J]. 沉积学报, 2004, 22(S1): 66-72.
XIAO Zhongyao, HUANG Guanghui, LU Yuhong, et al. Origin of oils from well Tadong 2 in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(S1): 66-72.
- [35] 张水昌, 王招明, 王飞宇, 等. 塔里木盆地塔东 2 油藏形成历史原油稳定性与裂解作用实例研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 25-31.
ZHANG Shuichang, WANG Zhaoming, WANG Feiyu, et al. Oil accumulation history in Tadong 2 Reservoir in Tarim basin, NW China: A case study of oil stability and cracking[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 25-31.
- [36] 唐友军. 塔里木盆地塔东 2 井寒武系稠油地球化学特征与成藏[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1208-1214.
TANG Youjun. Geochemical characteristics and reservoir formation of Cambrian heavy oil of well Tadong 2 in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1208-1214.
- [37] 孙玉善, 金英爱, 顾乔元, 等. 塔东 2 井古油藏成藏期分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 31-33.
SUN Yushan, JIN Ying'ai, GU Qiaoyuan, et al. Timing of pale-oils accumulation in Tadong No.2 well, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 31-33.
- [38] LI S M, SHI Q, PANG X Q, et al. Origin of the unusually high dibenzothiophene oils in Tazhong-4 Oilfield of Tarim Basin and its implication in deep petroleum exploration[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 48(1): 56-80.
- [39] LAFLAMME R E, HITES R A. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(3): 289-303.
- [40] WAKEHAM S G, SCHAFFNER C, GIGER W. Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent lake sediments-I. Compounds having anthropogenic origins[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(3): 403-413.
- [41] WOLFF G A, LAMB N A, MAXWELL J R. The origin and fate of 4-methyl steroid hydrocarbons 1. 4-methyl sterenes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(3): 335-342.
- [42] VOLKMAN J K, KEARMEY P, JEFFREY S W. A new source of 4-methyl and 5 α (H)-stanols in sediments: Prymnesiophyte microalgae of the genus *Pavlova*[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(5): 489-497.
- [43] 朱心健, 陈践发, 伍建军, 等. 塔里木盆地台盆区古生界原油碳同位素组成及油源探讨[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 997-1004.
ZHU Xinjian, CHEN Jianfa, WU Jianjun, et al. Carbon isotopic compositions and origin of Paleozoic crude oil in the platform region of Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 997-1004.
- [44] HUANG H P, ZHANG S C, SU J. Palaeozoic oil-source correlation in the Tarim Basin, NW China: A review[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 94: 32-46.
- [45] LI M J, WANG T G, LILLIS P G, et al. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic steroids and dinosteroids in oils and Cambrian-Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(12): 1643-1654.
- [46] MACHENZIE A S, BRASSELL S C, EGLINTON G, et al. Chemical fossils: The geological fate of steroids[J]. *Science*, 1982, 217(4559): 491-504.
- [47] MACHENZIE A S, HOFFMAN C F, MAXWELL J R. Molecular parameters of maturation in Toarcian shales, Paris Basin: III. Changes in the aromatic steroids hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(8): 1345-1355.
- [48] MACHENZIE A S, LAMB N A, MAXWELL J R. Steroids hydrocarbons and the thermal history of sediments[J]. *Nature*, 1982, 295(5846): 223-226.

第一作者简介: 包建平(1962-), 男, 江苏张家港人, 博士, 长江大学资源与环境学院教授, 主要从事油气地球化学研究与教学工作。地址: 湖北省武汉市蔡甸区蔡甸街大学路 111 号, 长江大学资源与环境学院, 邮政编码: 430100。E-mail: 101064@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2018-04-17 修回日期: 2018-06-25

(编辑 王晖)