

文章编号: 025322697(2008)012005206

珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征

郭小文 何生 石万忠

(中国地质大学资源学院 湖北武汉 430074)

摘要: 采用 GC2MS 分析技术, 在珠江口盆地番禺低隆起 5 口井 6 个轻质原油样品中检测到了联苯、萘、菲、二苯并噻吩等 13 个系列 200 多种化合物, 详细分析了轻质原油芳烃地球化学特征。L1 井和 P1 井轻质原油与 P2、P3 和 P4 3 口井的轻质原油芳烃化合物的分布特征差异较大, L1 井和 P1 井轻质原油样品中具有二苯并呋喃和芴系列化合物含量高、萘系列化合物含量低的特征, 而且这两类轻质原油的联苯系列和萘系列化合物相对丰度关系存在明显差异, 芴、硫芴和氧芴含量也表明了两组之间沉积环境的差异。这些都表明 L1 井和 P1 井轻质原油与 P2、P3 和 P4 3 口井的轻质原油的来源不同。P2、P3 和 P4 3 口井轻质原油母源为恩平组烃源岩, 而 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油可能主要来自于文昌组湖相泥岩, 或者为文昌组和恩平组烃源岩两者混合来源。芳烃中甲基萘、甲基菲和甲基二苯并噻吩成熟度参数反映番禺低隆起轻质原油样品成熟度已经处于高成熟演化阶段。

关键词: 珠江口盆地; 轻质原油; 芳烃化合物; 油源分析; 原油成熟度; 地球化学特征

中图分类号: TE122.43

文献标识码: A

Aromatic geochemistry characteristics of light oils from Panyu Lower Uplift in Pearl River Mouth Basin

GUO Xiaowen HE Sheng SHI Wanzhong

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: More than 200 aromatic compounds and 13 aromatic series of hydrocarbons such as biphenyl, naphthalene, phenanthrene, carbazole were found in six kinds of light oil samples from five wells in Panyu Lower Uplift of Pearl River Mouth Basin by using GC2MS analytical technique. The geochemistry characteristics of aromatic hydrocarbon in light oils were analyzed in detail. The results show that distributions of aromatic compounds in the light oils from Well L1 and Well P1 are different from those of Well P2, Well P3 and Well P4. The light oil samples from Well L1 and Well P1 contain more dibenzofuran and fluorene hydrocarbons and less naphthalene hydrocarbons. Meanwhile, the diversity of relative contents between biphenyl and naphthalene in two groups of light oils is apparent. The contents of fluorine, dibenzothiophene and dibenzofuran also show difference of sedimentary environment. The origin of light oils from Well L1 and Well P1 is different from that of Well P2, Well P3 and Well P4. It is suggested that the light oils from Well L1 and Well P1 derived from the lacustrine shales in Wenchang Formation or from the mixed source of Wenchang Formation and Enping Formation, while the light oils from Wells P2, Wells P3 and Wells P4 mainly originated from the source rocks in the Enping Formation. The maturity parameters of methyl naphthalenes, methyl phenanthrene and methyl carbazole from the aromatic hydrocarbons of light oils indicated that the maturity degrees of light oils reached the high maturity stage.

Key words: Pearl River Mouth Basin; light oil; aromatic hydrocarbon compound; oil source analysis; oil maturity; geochemistry characteristics

芳烃化合物可用于区分海陆相原油^[1]、指示原油母质沉积环境^[2,3], 同时可以利用芳烃化合物很好地反映原油母质沉积环境, 为油源分析研究提供有利证据。自 Radke 等提出甲基菲成熟度指标^[4]以来, 甲基萘成熟度参数^[5,6]、甲基菲成熟度参数^[4,7]和二苯并噻吩成熟度参数^[8,10]相继被提出并用于确定烃源岩和原油成熟度。由于芳烃成熟度参数比饱和烃中甾烷和萘烷成熟度参数有更宽的应用范围, 因此在有机质成熟度

评价中具有一定的优越性。在珠江口盆地番禺低隆起的天然气田中伴生着具有工业价值的轻质油或凝析油藏, 进一步揭示了本区具有良好的轻质油勘探前景。笔者对采集到的 6 个轻质原油样品进行了芳烃色谱-质谱分析, 对轻质原油芳烃地球化学特征进行了系统研究。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于中国南海北部、华南大陆的南缘,

基金项目: 国家重点自然科学基金项目(No. 40238060 和 No. 40602015)资助。

作者简介: 郭小文, 男, 1980 年 7 月生, 2006 年获中国地质大学(武汉)硕士学位, 现为 中国地质大学(武汉)在读博士研究生, 主要从事石油地质及油气地球化学研究工作。E-mail: guoxiaowen@2000.cug.edu.cn

面积约为 $1715 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地呈 NE 走向, 大致平行于华南大陆海岸线的陆架和陆坡区, 是华南大陆的水下延伸部分。盆地是在加里东海西燕山期褶皱基底上形成的中2新生带含油气盆地, 自北向南可划分为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带 5 个北东向的一级大型构造单元(图 1), 各个构造单元又划分为若干个凹陷和隆起。

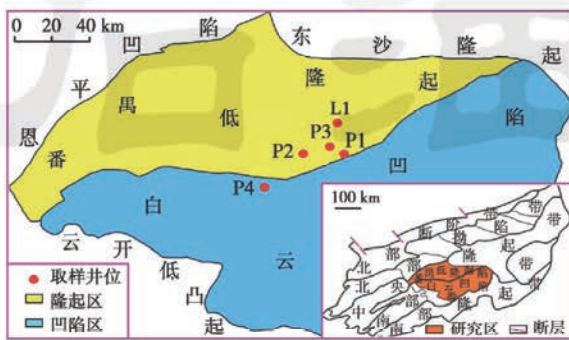


图 1 珠江口盆地构造与原油取样井位置

Fig. 1 Structure of Pearl River Mouth Basin and well positions for oil samples

番禺低隆起位于珠江口盆地的中南部, 南与白云凹陷相邻, 东与东沙隆起、神狐暗沙隆起分别以转换断层和隐伏断层相接, 北与恩平凹陷边界断裂相接。自下而上发育有始新世文昌组、渐新世恩平组、中新世珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、上新世万山组和第四

系, 其中白云凹陷文昌组、恩平组和珠海组为本研究区 3 套主要烃源岩, 厚度大, 分布范围广。文昌组烃源岩主要为中2深湖相沉积, 有机质类型较好, 以 δ_1 型为主, 文昌组浅湖相烃源岩有机质类型以 δ_2 型为主, 部分为 δ_1 型; 恩平组烃源岩为沼泽相、河流相和滨2浅湖相沉积, 有机质类型为 δ 型和 δ 型。本次研究所取 6 个轻质原油样品井位见图 1, 对这些样品有机地球化学特征进行了分析, 通过分析各样品芳烃化合物的组成和相对含量研究轻质原油母质沉积环境和来源, 并利用甲基萘、甲基菲和甲基二苯并噻吩化合物确定了轻质原油成熟度。

2 样品分析

所取得珠海组和珠江组地层中的 6 个轻质原油色浅、密度小(均小于 0.83 g/cm^3), 原油特征分析数据如表 1 所示, 其族组成以饱和烃含量最高, 芳烃和非烃具有一定差异, L1 井和 P1 井的两个原油样品芳烃含量比其他原油样品低, 而非烃含量高于其他原油样品, 几乎不含有沥青质。Pr/Ph > 3, 反映原油母质与含煤层系有关。OEP 都趋于 1, 轻重比 C_{21-}/C_{22+} 高, 甾烷成熟度参数 $C_{29}S/S+R$ 均达到平衡值而失效, 轻质原油成熟度较高。原油母岩沉积环境为弱还原条件, 母质以陆源高等植物输入为主, 细菌和藻类也有少量贡献^[11]。

表 1 轻质原油有机地球化学特征

Table 1 Organic geochemistry characteristics of light oil samples

| 井号 | 层位 | 深度/m | 饱和烃/% | 芳烃/% | 非烃/% | 沥青质/% | Pr/Ph | OEP | C_{21-}/C_{22+} |
|----|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------|
| L1 | 珠江组下 | 2511~5 | 79.57 | 11.62 | 18.26 | 0 | 5.868 | 11.006 | 2.766 |
| P1 | 珠江组上 | 2249 | 86.78 | 2.15 | 10.37 | 0.07 | 5.994 | 11.019 | 6.505 |
| P2 | 珠江组下 | 2711~2726 | 93.19 | 4.17 | 0.42 | 0 | 6.752 | 11.042 | 12.854 |
| P3 | 珠江组下 | 2743~2758 | 83.11 | 11.10 | 0.70 | 0 | 6.657 | 11.031 | 4.315 |
| P4 | 珠海组 | 3612~3633 | 73.90 | 19.87 | 0.71 | 0 | 6.087 | 11.041 | 5.790 |
| P4 | 珠海组 | 3650~3660 | 70.85 | 21.71 | 0.79 | 0 | 7.399 | 11.072 | 3.458 |

3 轻质原油芳烃化合物地球化学特征

芳烃中所包含的化合物有几百种, 含有丰富的地球化学信息。本次研究从轻质原油样品中检测到的芳烃化合物有近 200 余种, 主要包括 13 个系列, 即: 联苯系列(m/z154, m/z168, m/z182, m/z196) 和萘联苯系列(m/z204, m/z218); 萘系列(m/z128, m/z142, m/z156, m/z170, m/z184, m/z198); 菲系列(m/z178, m/z192, m/z206, m/z220, m/z234); 二苯并噻吩系列(m/z184, m/z198, m/z212, m/z226) 和苯并萘并噻吩系列(m/z234, m/z248, m/z262); 二苯并呋喃系列(m/

z168, m/z182, m/z196) 和苯并萘并呋喃系列(m/z218); 荧蒽系列(m/z202, m/z216) 和苯并荧蒽系列(m/z252, m/z266); 芴系列(m/z166, m/z180, m/z194, m/z208); 蒽系列(m/z228, m/z242, m/z256); 芘系列(m/z202, m/z230)。

图 2 为轻质原油样品芳烃馏分 GC/MS 总离子流图, 从中看出 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品与其余 4 个轻质原油样品芳烃化合物分布特征的差异比较大, 对定性的化合物 13 个系列芳烃化合物相对含量进行归一化计算(表 2)表明, L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品相对于其余 4 个轻质原油样品, 具有高含量的二苯并呋喃和

芴系列化合物及低萘系列化合物特征。芳烃化合物组成的差异指示了番禺低隆起轻质原油具有不同的母质来源。油源对比研究表明, P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品母岩为恩平组烃源岩^[11], 因此, 推断 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油源岩主要为文昌组湖相泥岩^[12], 或者为文昌组和恩平组烃源岩两者混合来源。

3.1 联苯系列化合物

联苯系列化合物是芳烃馏分中很重要的一类化合物, 来源于陆源高等植物。6 个轻质原油样品中检测到的联苯系列化合物含量占芳烃总含量的 18.12%~26.47%, 包括一甲基联苯、二甲基联苯、三甲基联苯、乙基联苯, 其相对含量关系如图 3 所示图中, A 为 L1 井珠江组下 2511.5 m; B 为 P1 井珠江组上 2249 m; C 为 P2 井珠江组下 2711~2726 m; D 为 P3 井珠江组下 2743~2758 m; E 为 P4 井珠海组 3612~3633 m; F 为 P4 井珠海组 3650~3660 m。L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品与 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品联苯化合物分布明显不同。P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品除一甲基联苯相对含量高于 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品外, 二甲基联苯、三甲基联苯和乙基联苯的相对含量相对于 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品都偏低。这可能说明 L1 井和 P1 井 2 个

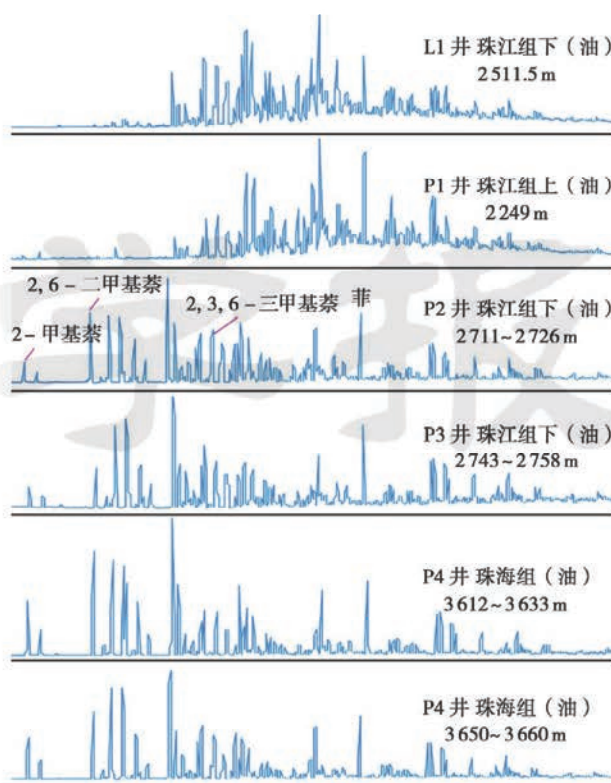


图 2 轻质原油芳烃馏分 GC/MS 总离子流图
Fig. 2 The TIC of aromatic hydrocarbon of light oils

表 2 番禺低隆起质原油样品芳烃组成特征

Table 2 Distribution of aromatic hydrocarbon in light oils of Panyu Lower Uplift

| 井号 | 层位 | 深度/m | 联苯/ % | 萘联苯/ % | 萘/% | 菲/% | 二苯并 噻吩/% | 苯并萘并 噻吩/% | 二苯并 呋喃/% | 苯并萘并 呋喃/% | 荧蒽/% | 苯并荧 蒽/% | 芴/% | 蒽/% | 比/% |
|----|------|-----------|----------|-----------|-------|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|------|------------|-------|-------|------|
| L1 | 珠江组下 | 2511.5 | 24.54 | 21.18 | 29.24 | 16.28 | 21.83 | 0.10 | 10.36 | 0.10 | 0.15 | 0.13 | 13.72 | 0.24 | 0.12 |
| P1 | 珠江组上 | 2249 | 22.88 | 21.48 | 20.70 | 22.43 | 31.71 | 0.03 | 10.68 | 0.04 | 0.17 | 0.04 | 16.39 | 0.15 | 0.28 |
| P2 | 珠江组下 | 2711~2726 | 26.47 | 21.93 | 32.49 | 18.00 | 21.88 | 0.22 | 7.79 | 0.20 | 0.21 | 0.09 | 8.19 | 0.36 | 0.17 |
| P3 | 珠江组下 | 2743~2758 | 18.12 | 31.58 | 36.19 | 21.82 | 31.29 | 0.62 | 51.78 | 0.29 | 0.38 | 0.70 | 7.41 | 11.53 | 0.29 |
| P4 | 珠海组 | 3612~3633 | 24.25 | 21.78 | 35.15 | 19.04 | 21.06 | 0.16 | 4.36 | 0.08 | 0.17 | 0.04 | 11.26 | 0.30 | 0.35 |
| P4 | 珠海组 | 3650~3660 | 21.38 | 21.95 | 37.99 | 19.29 | 21.04 | 0.23 | 4.80 | 0.07 | 0.21 | 0.06 | 10.09 | 0.48 | 0.41 |

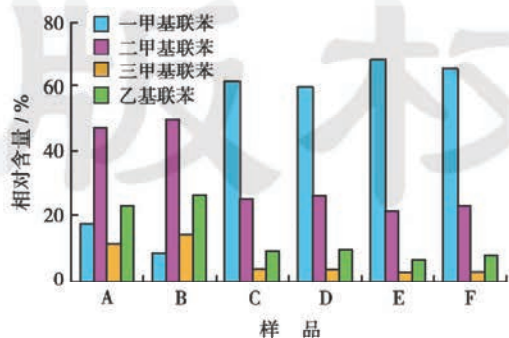


图 3 轻质原油联苯系列化合物分布特征

Fig. 3 Distribution of biphenyl hydrocarbon in light oils

轻质原油样品与 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品母质不同。

3.2 萘系列化合物

萘和多甲基取代萘系列普遍存在于沉积有机质和原油中, 芳烃中萘系列化合物的含量与陆源有机质输入量有直接的关系。萘系列化合物的分布受母源、热演化程度的影响, 因此可以用甲基取代萘来反映原油母源和成熟度方面的信息。6 个轻质原油样品中萘系列化合物占芳烃总含量的 20.17%~37.99%, L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品中萘系列化合物含量比 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品低, 说明 L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品母质陆源有机质输入相对较弱。

所检测到的萘系列化合物包括萘 (N)、一甲基萘 (MN)、二甲基萘 (DMN)、三甲基萘 (TMN)、四甲基萘

(TeMN) 和乙基萘, 其相对含量分布特征如图 4 所示。从图中可见, L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品与 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品萘系列化合物组成有明显差异。L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品相对 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品具有三甲基萘和四甲基萘含量高、一甲基萘和二甲基萘含量低的特征, 也说明这两类轻质原油具有不同来源。

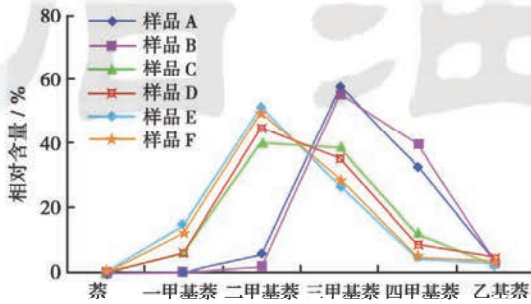


图 4 轻质原油萘系列化合物分布特征

Fig. 4 Distribution of naphthalene in light oils

多甲基萘成熟度指标可作为研究烃源岩及原油的很好参数。2, 3, 6, 2 三甲基萘与 2, 3, 6+ 1, 2, 5 三甲基萘比值和 1, 3, 6, 7, 2 四甲基萘与 1, 3, 6, 7+ 1, 2, 5, 6, 2 四甲基萘比值可用于确定低-高成熟整个热演化阶段原油和生油岩的成熟度, 并不受运移过程分馏效应的影响, 对成熟度的变化反映灵敏, 高成熟原油和烃源岩的这两个比值都大于 0.15^[13]。番禺低隆起 6 个轻质原油样品 2, 3, 6, 2 三甲基萘与 2, 3, 6+ 1, 2, 5 三甲基萘比值为 0.65~0.85, 1, 3, 6, 7, 2 四甲基萘与 1, 3, 6, 7+ 1, 2, 5, 6, 2 四甲基萘比值为 0.55~0.84, 表明这 6 个轻质原油样

品均为高成熟原油。

3.3 菲系列化合物

菲系列化合物主要用于研究原油和烃源岩的成熟度, 某些化合物对沉积环境和有机母源输入也有指示意义。妥进才认为如果说萘系列化合物来源于陆源高等植物的话, 那菲系列化合物可能与低等水生生物的关系更为密切^[14]。6 个轻质原油样品中菲系列化合物占总芳烃的 16.128%~22.143%, 包括菲(P)、甲基菲(MP)、二甲基菲(DMP)、三甲基菲(TMP)、四甲基菲(TeMP)和乙基菲。菲系列化合物内部相对丰度由大到小排序为甲基菲, 菲, 二甲基菲, 三甲基菲, 乙基菲, 四甲基菲。没有检测到萘烯, 芳烃中的萘烯常常被看作是陆源高等植物输入的标志物, 但萘烯含量会随成熟度的升高而减小^[15], 因此高成熟轻质原油是使萘烯缺失的主要原因。

在热演化过程中, 菲系列甲基化、甲基重排及脱甲基化作用主要受热力学控制, 热力学不稳定的 A 位取代基向较稳定的 B 位迁移, 即具有 B 位取代的异构体的相对浓度增加。Radke 等利用菲及甲基菲的相对丰度计算成熟度的参数甲基菲指数(MPI1), 提出了由 MPI1 折算镜质体反射率 R_o 的方法^[14], 国内外学者又对此进行了深入探索和研究, 用以解决原油和烃源岩的成熟度问题。用于反映番禺低隆起的 6 个轻质原油样品成熟度甲基菲参数 MPI1、MPI3、MPR2、DPR4 与 DPR2 都具有很好的线形正相关性(图 5), 说明这些甲基菲成熟度指标可以用于研究本地区轻质原油成熟度。6 个轻质原油样品的 MPI1 为 0.73~0.83, 由此计算得到原油成熟度 R_o 为 0.84%~0.90%。这显

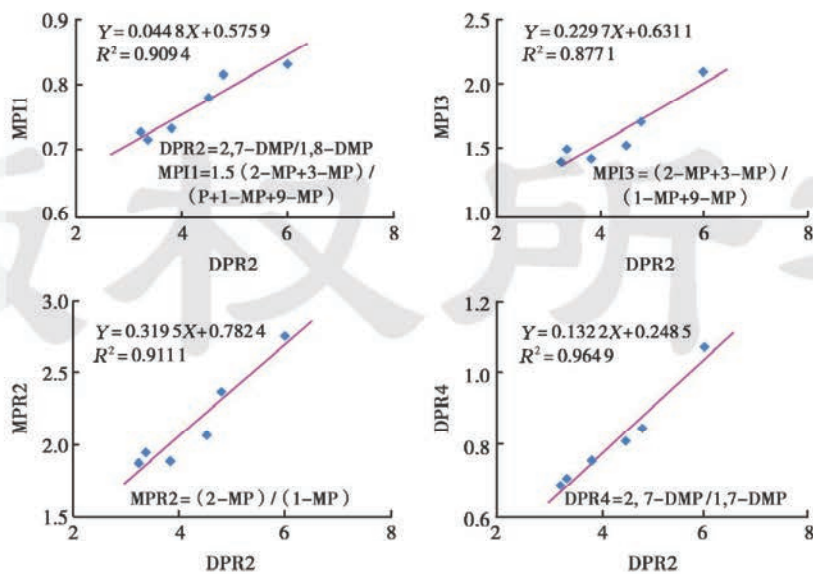


图 5 轻质原油甲基菲成熟度参数相互关系

Fig. 5 The relations of the methylphenanthrene maturity parameters in light oils

然与轻质原油实际情况不符,而且与前人的研究结果也存在矛盾^[16]。所以,这应该是原油达到较高成熟度($R_o=11.3\%$)后 MPI1 下降的结果,表征轻质原油样品成熟度 R_o 在 11.3% 以上。反映甲基菲异构化程度的 MPI3 值为 11.4~21.1,表明相对稳定的 B 位甲基含量明显高于较不稳定的 A 位甲基含量,这也说明番禺低隆起轻质原油成熟度比较高。

3.1.4 三芴系列化合物

三芴系列化合物是对芳烃的地球化学研究中涉及最多的芳烃化合物之一,包括芴、硫芴(噻吩类化合物)和氧芴(呋喃类化合物),通常用于说明有机质沉积时的环境条件,同时也用来进行油源对比研究。陆相淡水烃源岩和原油芴含量高,沼泽相煤和煤成油氧芴含量高,盐湖相、海相碳酸盐岩烃源岩及原油二苯并噻吩类化合物含量高^[17]。6个轻质原油样品中二苯并噻吩系列化合物含量都比较低,占芳烃总含量的 21.04%~31.71%,明显低于芴和氧芴系列化合物的含量。L1 井和 P1 井 2 个轻质原油样品芴和氧芴系列化合物的含量明显高于 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品,反映两类原油母质沉积环境的不同。

芴、硫芴(二苯并噻吩)和氧芴(二苯并呋喃)相对含量是反映母源沉积环境的良好指标。番禺低隆起 6 个轻质原油样品芴、硫芴和氧芴相对含量都以芴含量最高, L1 井和 P1 井两个轻质原油样品硫芴含量大于氧芴,而 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品氧芴大于硫芴(图 3),也说明这两类原油油源具有差异性。

表 3 轻质原油芴、硫芴和氧芴相对含量特征
Table 3 Distribution of fluorine, dibenzothiophene and dibenzofuran in light oils

| 井号 | 层位 | 深度/m | 芴/% | 氧芴/% | 硫芴/% |
|----|------|-----------|-------|-------|-------|
| L1 | 珠江组下 | 2511~5 | 54.96 | 14.58 | 30.46 |
| P1 | 珠江组上 | 2249 | 56.26 | 4.97 | 38.77 |
| P2 | 珠江组下 | 2711~2726 | 38.88 | 37.60 | 23.52 |
| P3 | 珠江组下 | 2743~2758 | 37.66 | 32.51 | 29.82 |
| P4 | 珠海组 | 3612~3633 | 68.02 | 19.46 | 12.53 |
| P4 | 珠海组 | 3650~3660 | 65.81 | 19.73 | 14.46 |

二苯并噻吩类化合物相对组成和分布与有机质和原油成熟度呈现出稳定的相关关系^[1],可以作为有机质和原油热演化的成熟度参数。烷基二苯并噻吩分布在热力作用下发生剧烈变化,稳定性较高与稳定性较差的异构体的相对丰度,随热演化程度的增加而增加。从轻质原油甲基二苯并噻吩质量色谱图(图 6)可以看出,42MDBT 峰为最高峰,而 12MDBT 相对于 42MDBT 峰明显偏低,反映了热动力学最稳定的 B 位取代异构体 42 甲基二苯并噻吩(42MDBT)相对于不稳定的 A

位取代异构体 12 甲基二苯并噻吩(12MDBT),其丰度具有明显优势,这说明轻质原油具有高成熟度特征。

甲基二苯并噻吩参数 K_{24} 、 K_{46} 、 C/F 、 $Peak3/Peak5$ 可以很好地反映烃源岩和原油成熟度。番禺低隆起 6 个轻质原油样品甲基二苯并噻吩参数 K_{24} 、 K_{46} 、 C/F 、 $Peak3/Peak5$ 值见图 6,在本研究区取得了与 P2、P3 和 P4 3 口井的 4 个轻质原油样品同源的恩平组烃源岩样品,其镜质体反射率 R_o 为 11.15%,参数 K_{24} 、 K_{46} 、 C/F 和 $Peak3/Peak5$ 值分别为 11.38、11.74、21.0 和 21.02,相对于轻质原油样品明显偏低,这可能说明轻质原油成熟度更高,已经处于高成熟阶段,这与其他指标反映的结果具有一致性。

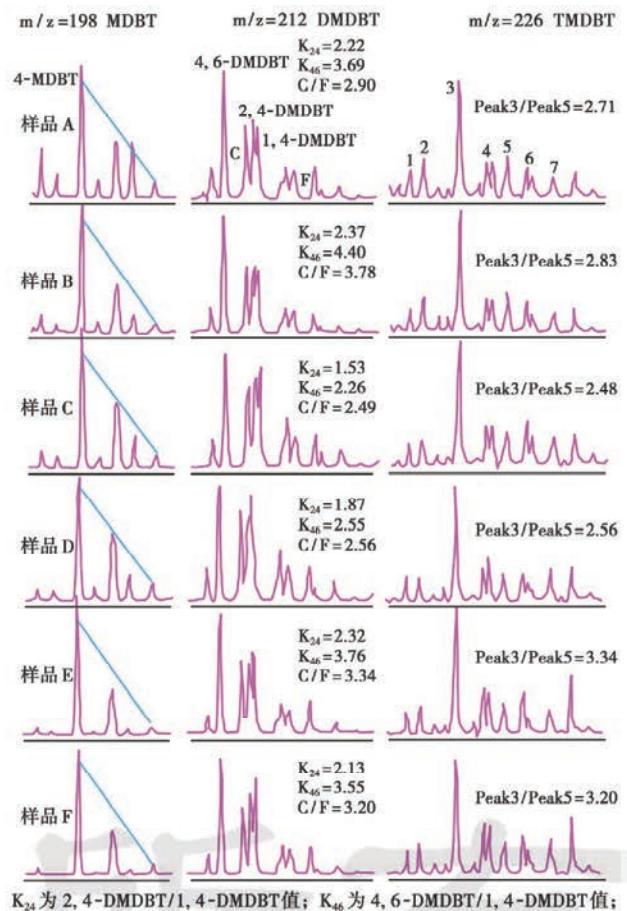


图 6 轻质原油甲基二苯并噻吩质量色谱

Fig. 6 GC/MS chromatograms of methylcarbazole in light oils

4 结论

(1) 番禺低隆起 5 口井 6 个轻质原油样品的芳烃化合物组成、联苯系列、萘系列和三芴系列化合物内部相对丰度关系表明, L1 井和 P1 井的 2 个轻质原油样品与 P2、P3 和 P4 井的 3 个轻质原油样品在源岩母质输入和沉积环境方面都有一定的差异。P2、P3 和 P4 井的 4 个轻质原油样品源岩为恩平组煤系烃源岩,而

L1 井和 P1 井 2 个轻质原油可能主要来源于文昌组湖相泥岩或者为文昌组和恩平组烃源岩两者混合来源。

(2) 对于番禺低隆起 6 个轻质原油样品, 饱和烃成熟度指标都已经达到异构化终点而失效, 芳烃中甲基萘、甲基菲和甲基二苯并噻吩成熟度参数却是较有效的成熟度指标。对番禺低隆起 6 个轻质原油成熟度的研究表明, 番禺低隆起轻质原油样品成熟度都已经处于高成熟演化阶段。

参 考 文 献

- [1] 张敏, 张俊. 塔里木盆地原油噻吩类化合物的组成特征及地球化学意义[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 122-126.
Zhang Min, Zhang Jun. Composition characteristics and geochemical significance of thiophene-type compounds for crude oils in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 122-126.
- [2] 朱扬明, 张洪波, 傅家谟, 等. 塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 33-37.
Zhu Yangming, Zhang Hongbo, Fu Jiemo, et al. Distribution and composition of aromatic hydrocarbon in various oils from Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 33-37.
- [3] 李景贵, 刘文汇, 郑建京, 等. 库车坳陷陆相烃源岩及原油中的芴系列化合物[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 40-43.
Li Jinggui, Liu Wenhui, Zheng Jianjing, et al. Dibenzofuran series of terrestrial source rocks and crude oils in Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 40-43.
- [4] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index(MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [C] M Advances in Organic Geochemistry. Wiley, Chichester, 1981: 504-512.
- [5] Radke M, Rullkötter J, Vriend S P. Distribution of naphthalenes in crude oils from the Java Sea: Source and maturation effects [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(17): 367-3689.
- [6] Van Aarssen B G K, Bastow T P, Alexander R, et al. Distributions of methylated naphthalenes in crude oils: Indicators of maturity, biodegradation and mixing [J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(10): 1213-1227.
- [7] Boreham C J, Crick I H, Powell T G. Alternative calibration of the methylphenanthrene index against vitrinite reflectance: Application to maturity measurements on oils and sediments [J]. Organic Geochemistry, 1988, 12(3): 289-294.
- [8] Radke M, Willsch H. Extractable alkyl-dibenzothiophenes in Posidonia shale (Toarcian) source rocks: Relationship of yields to petroleum formation and expulsion [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(23): 5223-5244.
- [9] Chakhmakchev A, Suzuki N. Aromatic sulfur compounds as maturity indicators for petroleum from the Bazuluk depression, Russia [J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(7): 617-625.
- [10] 黄龙威. 东濮凹陷西斜坡地区原油成熟度研究[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 512-55.
Huang Longwei. Maturity of crude oil in west slope of Dongpu Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 512-55.
- [11] 郭小文, 何生. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油地球化学特征及对比研究[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 63-67.
Guo Xiaowen, He Sheng. Geochemical characteristics and origin of the light crude oils in Panyu Lower Uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5): 63-67.
- [12] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 珠江口盆地番禺低隆起凝析油地球化学特征及油源分析 [J]. 中国海上油气, 2006, 18(2): 103-106.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong et al. Geochemical characteristics and oil sources of condensates in Panyu Low Uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(2): 103-106.
- [13] 陈致林, 李素娟, 王忠. 低中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 192-197.
Chen Zhilin, Li Sujuan, Wang Zhong. A study on maturity indicators of some aromatics in low to mid-mature thermal evolution zones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 192-197.
- [14] 晏进才. 柴达木盆地第三系芳烃的地球化学: 二环芳烃与多环芳烃的关系 [J]. 石油实验地质, 1996, 18(4): 406-412.
Tuo Jincai. Geochemistry of the tertiary aromatic hydrocarbons in the Qaidam basin: relationship between dicyclic and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Experimental Petroleum Geology, 1996, 18(4): 406-412.
- [15] Wilhelms A, Telnos N, Steen A, et al. A quantitative study of aromatic hydrocarbons in a natural maturity shale sequence: the methylphenanthrene/retene ratio, a pragmatic maturity parameter [J]. Organic geochemistry, 1998, 29(3): 97-105.
- [16] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 珠江口盆地番禺低隆起天然气成因和气源分析 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 456-459.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong, et al. Natural gas origins and gas source studies of Panyu Low Uplift in Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 456-459.
- [17] Fan P, Philp R P, Li Z, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons in crude oils and source rocks from different sedimentary environments [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1/3): 427-435.

(收稿日期 2007-02-23 改回日期 2007-02-02 编辑 张怡)