

文章编号: 0253-9985(2005)04-0494-07

松辽盆地原油芳烃分布、组成特征与原油类型划分

李振广, 冯子辉, 宋桂侠, 王 雪

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

摘要: 通过色谱-质谱 (GC-MS) 分析, 松辽盆地黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子、扶余油层原油共检测到萘、菲、蒽、联苯、芴、二苯呋喃、二苯并噻吩、三芳甾等 11 个系列 164 种芳烃化合物。其中, 黑帝庙、萨尔图油层原油主要由三芳甾类化合物和菲系列化合物组成, 葡萄花油层原油主要由菲系列和蒽系列化合物组成, 高台子、扶余油层原油主要由菲系列、蒽系列和三芳甾类化合物所构成。菲系列、蒽系列和三芳甾类化合物在纵向上的分布, 均以葡萄花油层为拐点, 由浅层黑帝庙油层至深层扶余油层, 菲系列、蒽系列呈现了由低变高的趋势, 三芳甾类表现了由高变低的趋势。根据三芳甾含量、三芳甾类/菲系列、二甲基菲/三芳甾烷的组合关系, 松辽盆地原油可划分为黑帝庙、萨尔图油层高三芳甾类原油, 高台子、扶余油层低三芳甾类原油和葡萄花油层痕量三芳甾类原油。松辽盆地原油含有三芳甾类化合物和二苯并噻吩/菲很小, 表明松辽盆地烃源岩主要形成于淡水-微咸水湖相的弱氧化环境。

关键词: 芳烃特征; 三芳甾烷; 原油; 松辽盆地

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A

Distribution and composition of aromatic hydrocarbons and classification of oil in Songliao basin

Li Zhenguang Feng Zhihui Song Guixia Wang Xue

(Exploration and Development Research Institute of Daqing Oil Field Company Ltd., Daqing, Heilongjiang)

Abstract Through gas chromatographic-mass spectrometric (GC-MS) analyses, 11 series and 164 aromatic hydrocarbons, including naphthalene, phenanthrene, chrysene, biphenyl, fluorene, dibenzofuran, dibenzothiophene, triaromatic steroid, etc., have been detected in oil sampled from Heidimiao, Saertu, Putaohua, Gaotaizi and Fuyu oil layers in Songliao Basin. Crude oil in Heidimiao and Saertu layers are mainly composed of triaromatic sterides and compounds of phenanthrene family. Crude oil in Putaohua layer are mainly composed of compounds of phenanthrene and chrysene families. Crude oil in Gaotaizi and Fuyu layers are mainly composed of compounds of phenanthrene and chrysene families and triaromatic sterides. All the break-points in vertical distributions of compounds of phenanthrene and chrysene families and triaromatic sterides appear at Putaohua layer, i.e. from the shallower Heidimiao layer to the deeper Fuyu layer, the contents of phenanthrene and chrysene families are tending to increase, while that of triaromatic sterides are tending to decrease. According to the content of triaromatic steroid and the combination of triaromatic sterides/phenanthrene family and dimethylphenanthrene/triaromatic steroid, crude oil in Songliao basin can be divided into three types, including the high triaromatic sterides crude oil in Heidimiao and Saertu layers, the low triaromatic sterides crude oil in Gaotaizi and Fuyu layers and trace triaromatic sterides crude oil in Putaohua layer. Based on crude oil in Songliao basin containing triaromatic sterides and the dibenzothiophene/phenanthrene being very low, it is believed that the

基金项目: 国家 973 项目 (2006CB701404)

第一作者简介: 李振广, 男, 52 岁, 高级工程师, 有机地球化学

收稿日期: 2005-06-28

source rocks in Songliao basin would have been deposited in weak oxidizing environment in freshwater-brackish lake

key words crude oil; Songliao basin; characteristics of aromatic hydrocarbon; triaromatic steroid

松辽盆地是世界上第一个在非海相沉积中发现的特大油田, 通过 40 多年的油气勘探已经证实, 在这个大型淡水-微咸水湖盆中, 油气资源十分丰富。认真总结、系统分析松辽盆地原油分子标志物特征及在不同地质条件下的变化, 对于追踪运移途径, 探索其原始生油母质等具有十分重要的意义。杨万里等对于松辽盆地原油地球化学特征已进行了详细研究^[1], 但对于松辽盆地原油的芳烃分布特征, 特别是不同层位原油的组成特征进行较详细的研究, 还未见有关报道。本文对松辽盆地上、中、下含油气组合的 5 个层位的原油芳烃化合物分布和组成特征进行研究并进行原油类型划分。

1 样品和实验

1.1 样品

10 个原油样品取自松辽盆地古龙凹陷, 包括上部组合的黑帝庙油层, 中部组合的萨尔图油层、葡萄花油层和高台子油层, 下部组合的扶余油层, 每个层位取两个样品, 具体井号、井深和密度、族组成特征见表 1。

1.2 分析条件

按石油天然气行业标准^[2] (SY/T 5119-1995) 获得芳烃馏分。用芳烃馏分在 TSQ 7000 色谱-质谱联用仪上进行色谱-质谱 (GC-MS) 分析。

表 1 松辽盆地原油基本特征

Table 1 Basic characteristics of crude oil in Songliao basin

序 号	井 号	井深 /m	层 位	族组成 /%				密度 / (g·cm ⁻³)
				饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	
1	古 52	1 288.60~1 290.60	黑帝庙油层	60.8	21.00	15.90	2.3	0.846
2	古 10	1 488.20~1 489.80	黑帝庙油层	66.7	15.26	15.14	2.9	0.844
3	金 2	1 771.00~1 805.20	萨尔图油层	67.3	18.26	11.41	3.0	0.865
4	金 24	1 804.00~1 836.40	萨尔图油层	60.7	19.26	18.14	1.9	0.877
5	金 2	1 902.40~1 905.40	葡萄花油层	69.7	18.93	9.16	2.2	0.847
6	金 22	1 904.80~1 916.00	葡萄花油层	64.0	19.97	13.44	2.6	0.851
7	古 203	1 919.00~1 921.80	高台子油层	67.3	17.14	11.39	4.2	0.875
8	古 921	1 986.00~2 022.80	高台子油层	73.6	17.62	7.99	0.8	0.854
9	古 203	2 248.20~2 324.00	扶余油层	70.0	20.54	9.43	0	0.861
10	古 921	2 191.00~2 207.40	扶余油层	73.7	17.00	8.67	0.6	0.851

色谱分析条件: HP-5ms 石英毛细柱 (60m × 0.25 mm × 0.25 μm)。升温程序为: 50℃ 恒温 1 min, 从 50℃ 升温到 100℃ 升温速率为 20℃/min, 从 100℃ 升温到 320℃ 升温速率为 3℃/min, 在 320℃ 恒温 15 min。载气用 He, 气化室温度为 300℃。质谱条件: EI 源 (70 eV)。全扫描质量范围: 50~500 u, 扫描时间 1.2 s。

1.3 检测结果

共检测到以下系列和单体芳烃化合物^[3]: 萘系列 (m/z 128~198); (2) 菲系列 (m/z 178~220); (3) 蒽系列 (m/z 228~256); (4) 芴系列 (m/z 166~194); (5) 二苯并呋喃 (氧芴) 系列

(m/z 168~196); (6) 二苯并噻吩 (硫芴) 系列 (m/z 184~226); (7) 联苯系列 (m/z 154~182); (8) 芘系列 (m/z 202~216); (9) 三芳啞系列 (m/z 231); (10) 甲基三芳啞系列 (m/z 245); (11) 三芳甲藻啞烷系列 (m/z 245); (12) 蒽 (m/z 178); (13) 苯并 [a] 蒽 (m/z 228); (14) 苯并萤蒽 (m/z 252); (15) 苯并 [e] 芘 (m/z 252); (16) 苯并 [a] 芘 (m/z 252); (17) 芘 (m/z 252); (18) 萤蒽 (m/z 202); (19) 苯并 [a] 芴 (m/z 216); (20) 苯并 [b] 芴 (m/z 216), 共检测到 11 个系列, 164 个芳烃化合物。

不同层位原油芳烃分布组成见图 1。松辽盆

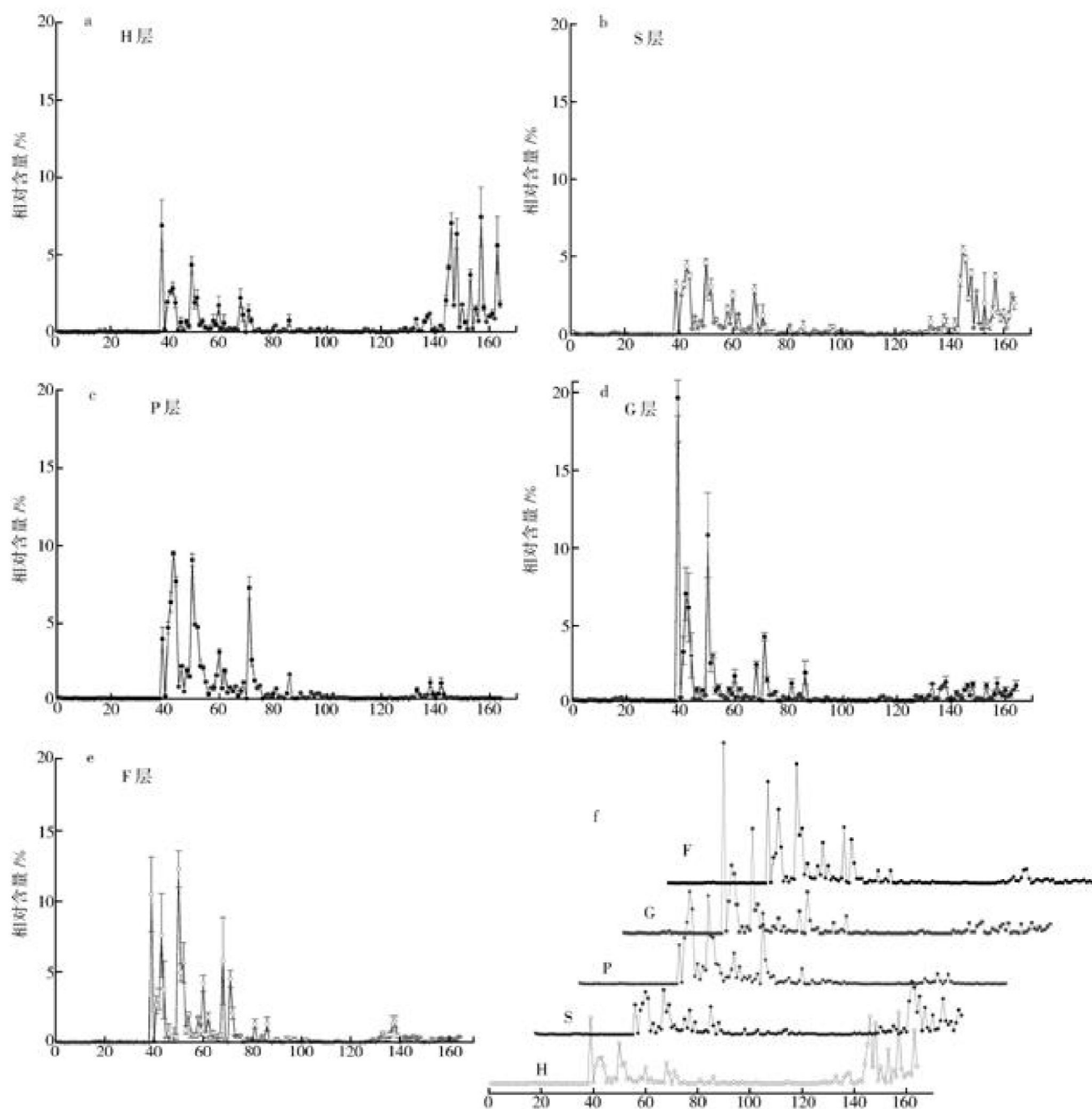


图 1 松辽盆地齐家-古龙凹陷不同层位原油芳烃含量组成图

Fig. 1 Diagram showing contents of aromatic hydrocarbons of crude oil in different layers in Qijia-Gulong depression, Songliao basin

注: 1. a—黑帝庙油层原油芳烃分布图; b—萨尔图油层原油芳烃分布图; c—葡萄花油层原油芳烃分布图; d—高台子油层原油芳烃分布图; e—扶余油层原油芳烃分布图; f—5个油层原油芳烃平均值对比图

2 H—黑帝庙油层; S—萨尔图油层; P—葡萄花油层; G—高台子油层; F—扶余油层

3 图中横坐标数字为化合物代号: 1萘; 2~38为萘系列化合物; 39菲; 40蒽; 41~69菲列化合物; 70苯并[a]蒽; 71蒽; 72~84蒽系列化合物; 85苯并[a]蒽; 86苯并[e]蒽; 87苯并[a]蒽; 88菲; 89二苯并噻吩; 90~108二苯并噻吩系列; 109联苯; 110~117联苯系列; 118二苯并呋喃; 119~126二苯并呋喃系列; 127芴; 128~136芴系列; 137萤蒽; 138比; 139苯并[a]芴; 140苯并[b]芴; 141~143甲基芴; 144~148三芳基; 149~164带取代基的三芳基烷(包括 C_{29} , 4, 23, 24-三甲基三芳基藻烷)

地原油中未检测到脱羟基微生物 E 系列。

2 结果与讨论

2.1 不同层位原油芳烃分布特征

通过对图 1 每一个油层原油芳烃的仔细观察可以看出相同层位原油芳烃分布相似, 不同层位的原油芳烃分布、组成都有其各自的特点。其中, 萨尔图油层 (S 层) 和葡萄花油层 (P 层) 内的两个样品原油芳烃分布差别较小。只有扶余油层 (F 层) 两块样品菲、9-甲基菲和三甲基菲差别稍大外, 其余部分相差不大。从 5 个层位原油芳烃化合物分布来看, 其中萘系列、联苯系列、氧芴系列含量极低, 几乎看不到它们存在。松辽盆地单个萘化合物最大值仅为 0.26%。从图 1f 中可以看出不同油层原油菲及其同系物的分布也明显不同的。其中, 黑帝庙油层 (H 层) 和高台子油层 (G 层) 以菲为该系列中的最高峰, 葡萄花油层以 9-甲基菲为最高峰, 萨尔图油层和扶余油层以 2,10+1,3+3,10+3,9-二甲基菲为最高峰。指示陆源生源的特征生物标志物卡达烯、蒎烯、蒹等含量都比较低, 除了蒎烯个别样品达 1.8% 以外其余都在 1.0% 以下。芘是一个 5 环芳烃, 徐灏^[4]对该化合物进行了专门研究, 认为芘可能来源于陆源有机质。他对湖南、四川 10 个海相碳酸盐岩样品分析, 没有检测出芘。对苏北油田、三水盆地、近代海洋沉积物 (其中的芘是由陆生生物进入海洋沉积物而形成的) 40 个样品中都检出有芘的存在。芘的存在取决于沉积环境和原始物质, 如果沉积物暴露于氧化条件, 绝大部分有机质包括芘均被氧化而分解、破坏。尚慧芸^[5]认为芘是陆相原油及生油岩中常见的生物标记物, 与陆生植物有成因联系。曾凡刚^[6]在广西钦州稔子坪矿褐煤中也检测到了芘, 认为芘来源于陆源有机质, 是未成熟标志物。另外, 煤系泥岩也含有丰富的芘^[7]。松辽盆地原油仅个别样品检测到极微量芘。芴和硫芴绝大部分样品为 1% ~ 3%。

松辽盆地黑帝庙、萨尔图油层原油主要由三芳甾类化合物和菲系列化合物组成, 占总芳烃化合物的 82.7% ~ 91.0%, 葡萄花油层原油主要由菲系列和蒽系列化合物组成, 它们占总芳烃化合物的 88.3% ~ 91.3%, 高台子、扶余油层原油主要

由菲系列、蒽系列和三芳甾类化合物构成, 它们占总芳烃化合物的 87% ~ 89%, 它们的相对组成情况见图 2。其中, 葡萄花、高台子、扶余油层原油菲系列高达 65% 以上 (葡萄花油层高达 75%)。从已发表的文献来看, 吐哈盆地烃源岩菲系列为 19.17% ~ 30.95%^[7]; 塔里木盆地不同成因原油菲系列为 11.6% ~ 31.0%^[8]; 柴达木盆地西部第三系生油岩芳烃馏分中, 菲系列化合物占总芳烃的 22.1% ~ 84.1%, 其中, 第三系的原油芳烃馏分中, 菲系列化合物约占总芳烃含量的 39.2% ~ 65.2%, 为芳烃馏分中含量最高的一类化合物; 柴达木盆地北部侏罗系煤系地层的原油中, 菲系列化合物在总芳烃中的含量变化为 4.40% ~ 12.93%^[9]。以及王铁冠* 统计的我国各类烃源岩的宏观组成, 包括碳酸岩烃源岩、盐湖相、淡水湖相以及煤系烃源岩, 菲系列通常在 36.09% ~ 53.14%。

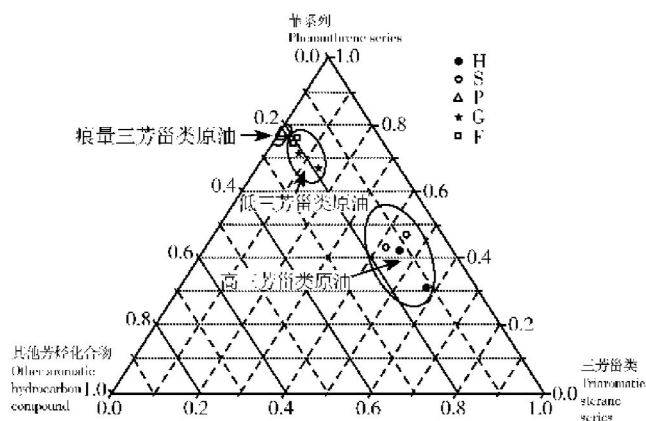


图 2 不同层位原油组成三角图

Fig. 2 Triangular diagram showing compositions of oil in different layers

综合以上文献, 尽管菲系列含量的算法不尽相同, 不同原油的菲系列含量均在 4.4% ~ 65.2%, 而松辽盆地葡萄花、高台子、扶余油层原油菲系列含量高达 65% 以上, 应属原油高菲含量的盆地。

从芳烃各主要系列化合物在不同层位的分布特征 (图 3), 可以看出二甲基菲系列在 5 个层位中都有较高含量。甲基菲系列除了在扶余油层和三甲基菲系列含量相当外, 在其余 4 个层位中均占有次高含量。菲在萨尔图、葡萄花油层中含量较低, 约为 3% ~ 4%, 高台子油层含量最高为

* 王培荣, 周光甲. 生物标志物地球化学, 1998

19.7%, 黑帝庙和扶余油层分别为 6.9% 和 10.5%。

菲系列含量从浅层黑帝庙油层到深层扶余油层是以葡萄花油层为拐点, 菲系列含量达到最高值, 总的变化规律呈现了由低变高的趋势。菲系列从最低的黑帝庙油层到最高的葡萄花油层, 其平均含量分别为 36.4% 和 75.6%, 最高和最低值相差约为 1 倍以上。

甾系列平均含量以葡萄花油层最高, 为 14.2%, 黑帝庙和萨尔图油层平均含量最低, 为 2.9% ~ 3.3%, 高台子和扶余油层介于 9.5% ~ 10.8%, 相差不大。与菲系列对应的是甾系列在葡萄花油层也是一个拐点。

松辽盆地原油芳烃化合物含量相差最大的是三芳甾类化合物, 含量最低的黑帝庙油层三芳甾类化合物平均含量仅为 0.6%, 而黑帝庙油层三芳甾类化合物平均含量可达 50.6%, 最高和最低平均含量相差 80 多倍。三芳甾类化合物从浅层黑帝庙油层到深层扶余油层也是以葡萄花油层为拐点, 只不过是变化规律与菲系列含量相反, 呈现了由高变低的趋势。

由上不难看出, 葡萄花油层原油是 5 个层位

原油的一个分界点, 它的菲系列、甾系列、三芳甾类化合物含量都发生突变。

2.2 松辽盆地原油类型划分

综合不同层位原油芳烃化合物分布情况, 编绘了松辽盆地原油类型划分图 (图 4)。从图 4 可以看出不同层位的原油数据点分布在不同的区域。根据图 4 结合图 3 及图 1, 松辽盆地齐家-古龙凹陷原油类型划分为 3 大类。

第一类原油, 即高三芳甾类原油, 包括黑帝庙油层和萨尔图油层原油。这类原油中三芳甾类化合物含量为 40% ~ 57%, 三芳甾类/菲系列为 0.94 ~ 1.83, 二甲基菲/三芳甾烷小于 1。

第二类原油为低三芳甾类原油, 包括高台子油层和扶余油层原油。它们的三芳甾类化合物含量为 4.24% ~ 13.52%, 三芳甾类/菲系列为 0.058 ~ 0.21, 二甲基菲/三芳甾烷为 5.42 ~ 19.1。

第三类原油即痕量三芳甾类原油, 为葡萄花油层原油。三芳甾类化合物含量仅为 0.45% ~ 0.76%, 三芳甾类/菲系列为 0.006 ~ 0.01, 二甲基菲/三芳甾烷可达 94.6 ~ 125。这类原油甲基菲、二甲基菲系列含量高, 甾系列化合物含量高, 三芳甾类化合物含量极低。

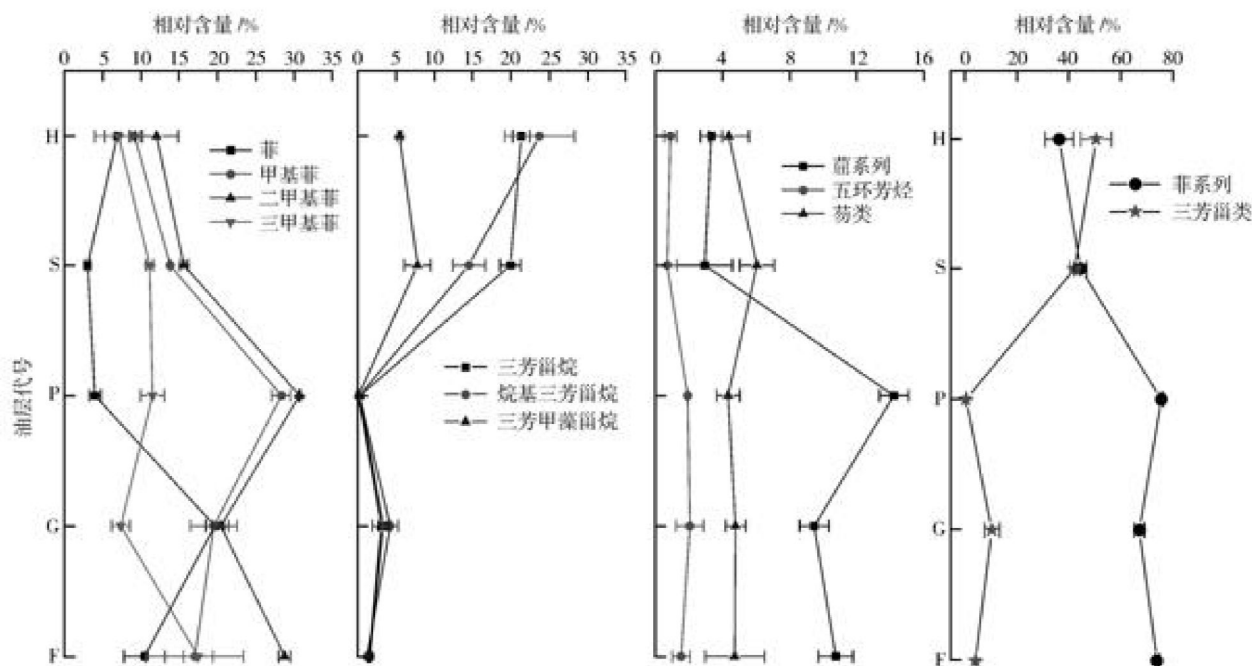


图 3 不同系列芳烃化合物在不同层位分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of different aromatic hydrocarbon families at various horizons

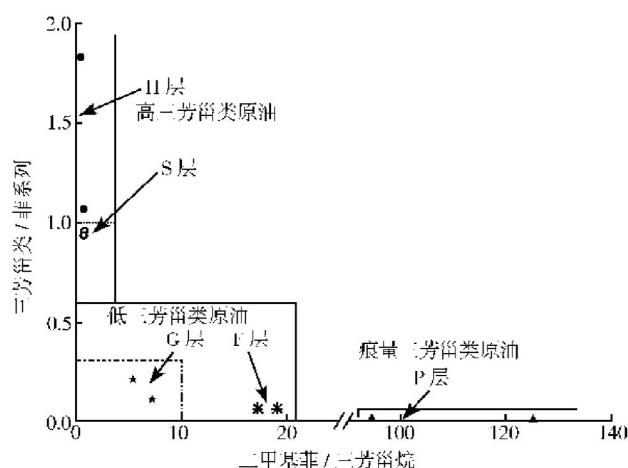


图4 松辽盆地原油类型划分图

Fig. 4 Classification of oil in Songliao basin

在上述分类的基础上,又可根据它们各自特征,进一步细分。如第一类原油,依据三芳甾类/菲系列大于1,二甲基菲/三芳甾类小于0.74,三芳甾类大于44.6%,划为黑帝庙油层;相反,划为萨尔图油层。

第二类原油又依据三芳甾类/菲系列大于0.1,二甲基菲/三芳甾类小于10,三芳甾类大于7%,划为高台子油层原油。反之,划为扶余油层原油。

目前这种分类只是根据每层两块样品所做的初步划分,确切的分类还需要大量分析数据的积累,加以完善。

有关松辽盆地原油类型的划分,1985年,杨万里等^[1]应用族组分、全烃色谱、红外、紫外、碳同位素和饱和烃生物标志化合物等资料,将松辽盆地白垩系7个油层划分为黑帝庙油层原油,萨尔图、葡萄花、高台子油层原油,扶余、杨大城子油层原油和农安油层原油4种类型。在饱和烃生物标志化合物和碳同位素等资料中萨尔图、葡萄花、高台子油层原油性质相似,很难进行划分,而用芳烃化合物资料可以明显地看出它们的差别。

2.3 沉积环境

原油的物理性质、化学性质及烃类组成特征与生油母质类型和演化、成油环境和后期保存条件等有着密切的关系。孟仟祥等^[10]通过不同沉积环境湖相低熟原油的芳烃分布特征的研究,表明淡水湖相低熟原油芳烃与咸水、盐湖相低熟原油芳烃的生物标志化合物分布有较大的差异。前者以菲、菲系列为主要组分,后者则以三芳甾为主要组

分。河南探区不同沉积环境的湖相原油中均检测出丰富的三芳甾烷系列化合物,且沉积古环境水体越咸,三芳甾烷在芳烃馏分中的相对丰度越高,丰富的三芳甾烷系列可能是盐湖环境和低成熟原油的反映。

梁狄刚等^[11]认为三芳甾烷的丰度与成熟度无关,同是高、过成熟烃源岩,有的层系富含三芳甾烷,有的不含或贫三芳甾烷;灰岩富含三芳甾烷,而同层的泥岩则不含或贫三芳甾烷。因此,三芳甾烷既能指示不同沉积环境、不同岩性的生源特征,又有不受成熟度影响的“指纹”作用。

松辽盆地古湖泊的水介质为淡水-微咸水,其盐度大体为0.05%~0.50%,属于少盐水,古龙凹陷盐度稍高为0.5%~1.0%,属于中盐水较淡的性质^[12]。由此认为松辽盆地中上部的黑帝庙、萨尔图油层原油和中下部的葡萄花、高台子、扶余油层原油在三芳甾类如此悬殊的差别,可能与其烃源岩的沉积环境有关。值得提到的是三芳甾类化合物近年来在油源对比方面也发挥了很好的作用,越来越受到人们的关注^[11,13,14]。

二苯并噻吩/菲是一个沉积环境参数^[15~20],可以表征原油成油母质的沉积环境,在强还原环境尤其是海相碳酸盐地层中,该比值>1.0,湖相沉积比值<1.0。松辽盆地原油二苯并噻吩/菲很小,约为0.002~0.032,表明松辽盆地烃源岩主要形成于淡水-微咸水湖相的弱氧化环境。

参 考 文 献

- 1 杨万里,高瑞祺,郭庆福,等. 松辽盆地陆相油气生成和聚集[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1985. 220~255
Yang Wanli, Gao Ruiqi, Guo Qingfu, et al. Generation, migration and accumulation of nonmarine petroleum in the Songliao basin, China[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1985. 220~255
- 2 钱志浩,王荣光,惠映组,等. 岩石可溶有机物和原油族组分柱层析分析方法 SY/T 5119-1995[M]. 北京:石油工业出版社,1996
Qian Zhihao, Wang Rongguang, Hui Yingzu, et al. Column chromatographic analysis of rock's dissolvable organic matter and group composition of crude oil SY/T 5119-1995[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996
- 3 侯读杰,张林晔. 实用油气地球化学图鉴[M]. 北京:石油工业出版社,2003. 158
Hou Dujie, Zhang Linye. Practical oil and gas geochemistry atlas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 158
- 4 徐谦. 花的质谱鉴定及其有机地球化学意义[J]. 石油与天然

- 气地质, 1982 3(4): 351~ 358
- Xu Lian Mass spectrometric characterization of perylene and its significance in organic geochemistry [J]. Oil & Gas Geology 1982 3(4): 351~ 358
- 5 尚慧芸. 陆相原油和生油岩特征生物标记物 [J]. 石油与天然气地质, 1989 7(3): 236~ 240
- Shang Huiyun Characteristic biomarkers of terrestrial oils and their source rocks [J]. Oil & Gas Geology 1989 7(3): 236~ 240
- 6 曾凡刚, 王铁冠, 吴朝东. 广西钦州稔子坪矿褐煤地球化学特征-芳烃馏分的生物标志物组合 [J]. 石油与天然气地质, 2000 21(2): 123~ 126
- Zeng Fangang Wang Tieguan Wu Chaodong Geochemical characteristics of brown coal from Nianziping mine Qinzhou Guangxi-biomarker assemblages of aromatic fraction [J]. Oil & Gas Geology 2000 21(2): 123~ 126
- 7 戴卿林, 郝石生, 盛国英, 等. 吐哈盆地侏罗纪煤系源岩芳烃组成及生源、环境意义 [J]. 沉积学报, 1997 15(2): 198~ 201
- Dai Qinglin Hao Shisheng Sheng Guoying et al Aromatic hydrocarbon compositions and significance of origin and sedimentary environments of Jurassic coal measure source rocks from the Turpan-Hami basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1997 15(2): 198~ 201
- 8 朱扬明, 张洪波, 傅家谟, 等. 塔里木不同成因原油组成和分布特征 [J]. 石油学报, 1998 19(3): 33~ 37
- Zhu Yangming Zhang Hongbo Fu Jiamo et al Distribution and composition of aromatic hydrocarbon in various oils from Tarin basin [J]. Acta Petrolei Sinica 1998 19(3): 33~ 37
- 9 妥进才. 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 bicyclic and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Experimental Petroleum Geology 1996 18(4): 406~ 412
- 10 孟仟祥, 张松林, 崔明中, 等. 不同沉积环境湖相低熟油的芳烃分布特征 [J]. 沉积学报, 1998 17(1): 112~ 120
- Meng Qianxiang Zhang Songlin Cui Mingzhong et al Distribution features of aromatics in lacustrine low mature crude oil from different environments [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1998 17(1): 112~ 120
- 11 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高过成熟区海相油源对比研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005 32(2): 8~ 14
- Liang Digang Chen Jianping Oil-source correlations for high- and overmature marine source rocks in southern China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2005 32(2): 8~ 14
- 12 杨万里. 松辽陆相盆地石油地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1985 1~ 3
- Yang Wanli Oil geology of Songliao terrestrial basin [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1985 1~ 3
- 13 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(增刊): 16~ 23
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Li Maowen et al Molecular fossil and oil-source correlation in Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2002 47(Supp): 16~ 23
- 14 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 轮南、塔河油田稠油油源对比 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(1): 31~ 38
- Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang et al Oil and source correlation in Lunan and Tahe heavy oil fields [J]. Oil & Gas Geology 2004 25(1): 31~ 38
- 15 姜乃煌, 黄第藩, 宋浮庆, 等. 不同沉积环境地层中的芳烃分布特征 [J]. 石油学报, 1994 15(3): 42~ 50
- Jiang Naihuang Huang Difan Song Fuqing et al Distribution characteristics of aromatics in formations under different sedimentary environments [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994 15(3): 42~ 50
- 16 曾凡刚, 程克明. 华北地区下古生界海相烃源岩芳烃生物标志物地球化学特征-兼论饱和烃、芳烃生源组合特征 [J]. 地质地球化学, 1998 26(3): 33~ 39
- Zeng Fangang Cheng Keming Characteristics of aromatic hydrocarbon biomarkers from Lower Palaeozoic marine carbonate rocks in North China [J]. Geology-Geochemistry 1998 26(3): 33~ 39
- 17 Hughes W B Holba A G, Dzou L P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995 59(17): 3581~ 3598
- 18 黄海平, 李虹, 马刊创, 等. 大民屯凹陷高蜡油的形成条件 [J]. 石油与天然气地质, 2001 22(1): 64~ 67
- Huang Haiping Li Hong Ma Kanchuang et al Formation condition of high wax oils in Damintun sag [J]. Oil & Gas Geology 2001 22(1): 64~ 67
- 19 张枝焕, 陶澍, 沈伟然, 等. 天津地区表地层土中芳香烃污染物化学组成及分布特征 [J]. 环境科学研究, 2003 16(6): 29~ 34
- Zhang Zhichuan, Tao Shu, Shen Weiran et al Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface soil samples from Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences 2003 16(6): 29~ 34
- 20 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-medium mature thermal evolution zones [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1997 15(2): 192~ 197

(编辑 李树森)