

松江盆地白垩系烃源岩地球化学特征及油源对比

周 健^{1,2}, 单玄龙^{1,2}, 郝国丽^{1,2}, 赵荣生^{1,2}, 陈 鹏^{1,2}

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:松江盆地白垩系发育大砬子组和长财组两套烃源岩。通过对烃源岩及原油进行常规有机地化分析和生物标志化合物测试,研究了烃源岩和原油的地球化学特征并探讨油源关系。有机地化分析表明,其白垩系烃源岩有机质丰度高,II₁-II₂型有机质,低成熟-成熟。大砬子组烃源岩生烃潜力大,长财组次之。生物标志化合物分析表明,白垩系部分烃源岩和原油遭受了一定程度的生物降解作用。长财组烃源岩可分为3类,第I和第II类生烃母质以高等植物为主,为偏氧化的淡水和微咸水沉积,第III类伽马蜡烷和 β 胡萝卜素含量丰富,为咸水环境沉积。大砬子组烃源岩为咸化的还原环境沉积,生烃母质为混合源。经油源对比表明,长财组下段原油来源于长财组第I类烃源岩,长财组上段原油来源于第II类烃源岩,而偏还原的大砬子组原油来源于大砬子组上段烃源岩。

关键词:生物标志化合物;油源对比;原油;烃源岩;白垩系;松江盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics of Cretaceous source rocks and oil-source correlation in the Songjiang Basin

Zhou Jian^{1,2}, Shan Xuanlong^{1,2}, Hao Guoli^{1,2}, Zhao Rongsheng^{1,2}, Chen Peng^{1,2}

[1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia (Ministry of Education), Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China]

Abstract: Two sets of Cretaceous source rocks, Dalazi and Changcai Formation, develop in the Songjiang Basin. In this study, we discussed the geochemical characteristics of source rocks and crude oil and the oil-source correlation based on the conventional organic geochemical analysis and biomarker compound test on Cretaceous source rocks and crude oil in the basin. The organic geochemical analysis indicates that Cretaceous source rocks are rich in organic matters, with the major organic matter being Type II₁-II₂, and the source rock maturity ranges from low-mature to mature degree. And the Dalazi Formation has the greatest potential of hydrocarbon generation, followed by Changcai Formation. The analysis of biomarker compounds show that some of the Cretaceous source rocks and crude oil are subjected to a certain extent of biodegradation. Besides, source rocks of the Changcai Formation can be divided into three groups: the organic matters of source rock Group I and II are mainly from higher plants, which are deposited in partially oxidized fresh and brackish water, and source rock Group III contains large amounts of gammacerane and β -carotane, deposited in saline water. Source rocks of the Dalazi Formation are mainly deposited in reductive-brackish water environment, and their parent materials come from mixed sources. The oil-source correlation reveals that the crude oil generated from the Changcai Formation can be divided into two categories: the K₁c¹ oil originates from Group I source rock and the K₁c² oil from the Group II source rock of the source formation. Meanwhile, the reductive-prone oil from the Dalazi Formation originates from its K₁d² section.

Key words: biomarker, oil-source correlation, crude oil, source rock, Cretaceous, Songjiang Basin

吉林省东部发育一系列中生代盆地,但油气勘探一直没有取得明显进展,主要问题是烃源岩及其潜力不

收稿日期:2017-06-13;修订日期:2018-03-15。

第一作者简介:周健(1992—),男,硕士研究生,矿产普查与勘探。E-mail:zhoujian16@mails.jlu.edu.cn。

通讯作者简介:单玄龙(1969—),男,教授、博士,石油与天然气勘探与开发。E-mail:shanxl@jlu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472304)。

清,松江盆地就是其中一个典型。近年来,一些学者对该盆地不同时代烃源岩地球化学特征和油气勘探前景进行了一些研究^[1],但未在地表发现过原油,也未曾将烃源岩和原油结合起来进行研究,油源关系尚不清楚。本文通过石油地质与地球化学研究,揭示了松江盆地2套烃源岩的有机质丰度、有机质的显微组成与类型、有机质成熟度等基本地球化学特征,分析了盆地内烃源岩与原油的饱和烃与芳烃的生物标志化合物特征,探讨了所反映的母质类型和沉积环境,基本确定了烃源岩与原油的母质成因、类型与成熟度,建立了可靠的油源关系。

1 地质背景

松江盆地位于吉林省东部安图县境内,面积约650 km²,盆地内属于低山-丘陵地带,地势大体呈东高西低。主体位于松江向斜,为一中新世断陷-坳陷复合型盆地(图1)。盆地基底为太古界和古元古界

变质岩结晶基底,沉积盖层自下而上为下白垩统帽儿山组、西山坪组、长财组和大砬子组。其中长财组和大砬子组为松江盆地主要烃源岩层,在松江盆地大面积出露。依据地震、重力和航磁等物探资料综合分析,将松江盆地划分为南北两部分,分别为北部坳陷和南部坳陷。北部坳陷面积约290 km²,长财组大面积出露地表。长财组按岩性可分为上段和下段两部分。下段为砂砾岩夹泥岩段,即灰白色砾岩、含砾粗砂岩、黄绿色砂岩、夹薄层泥岩,厚约925 m,沉积类型为冲积扇沉积^[2];上段为含煤砂岩段,夹有暗色泥岩和煤层,厚约532 m,为扇三角洲沉积类型。南部坳陷面积约360 km²,地表出露大砬子组。该组按岩性可分为两部分。下段为砂砾岩段,即黄褐色砾岩、灰绿色粗砂岩、灰黄色细砂岩和粉砂岩,厚约725 m,其沉积类型为冲积扇和扇三角洲沉积^[3-4];上段为油页岩段,即灰黑色纸片状页岩和深灰色细砂岩,盛产动物化石,厚约308 m,为半深湖-深湖相沉积^[5]。

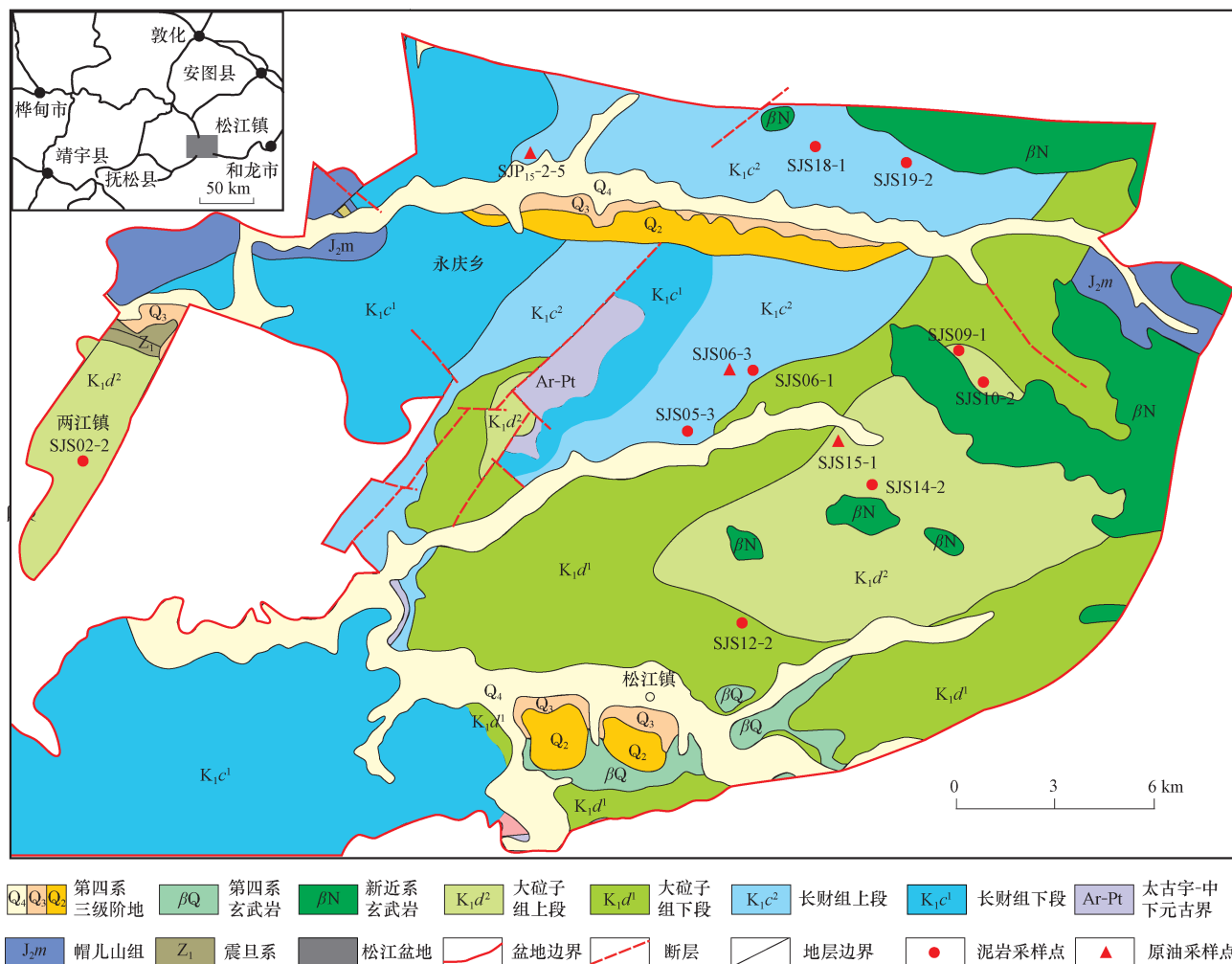


图1 松江盆地区域地质及样品分布(据董清水,2012年,修改)

Fig. 1 Regional geological map and sample distribution in the Songjiang Basin (modified from Dong Qingshui, 2012)

2 样品采集与实验

实验样品采自松江盆地,具体位置见图1。共采集烃源样品8件,其中长财组4件,大砬子组4件,均为泥岩。对所采样品测定了总有机碳含量,进行了氯仿抽提且测定了氯仿沥青“A”含量;进行了干酪根的制备,分析了干酪根的显微组分;测定了镜质体反射率,进行了Rock-Eval热解实验。此外还对部分烃源岩进行了碳13($\delta^{13}\text{C}$)稳定同位素测定。①总有机碳含量测定和Rock-Eval热解实验流程为:将样品经去离子水多次超声波洗净烘干后,用玛瑙研钵人工磨碎至低于80目,将分离出的3g样品经前处理后在CS-344碳硫分析仪和Rock-Eval6岩石热解仪上分别进行总有机碳(TOC)和Rock-Eval岩石热解分析。②氯仿沥青“A”测定流程为:将岩石样品粉碎为小于0.09mm的粉末,取200~400g装入滤纸做成的袋中,放在抽提器的样品室中,在水浴上氯仿沸温条件下采用索氏抽提法不断用氯仿抽提72h,通过溶剂的回流,将样品中的有机质萃取出来。抽提至荧光3级以下,自然干燥后计算单位岩石中氯仿沥青抽提物的含量,即为氯仿沥青“A”的含量。③干酪根的制备和显微组分鉴定流程为:岩石样品粉碎为小于0.18mm的粉末,取不少于50g放入酸反应容器中,经酸处理和碱处理后进行重液浮选,将富集的干酪根用氯仿清洗,干燥后置于具有白光和荧光功能的生物显微镜下鉴定,对不同显微组分采用不同的加权系数,计算后得出干酪根样品的类型指数并划分干酪根类型。④镜质体反射率的测定流程为:用试样压平器,胶泥和载玻片将制作好的光片固定在载玻片上,光片应在X25至X50的干物镜与一定倍数的目镜配合下进行检查。要求基本无擦痕、无抛光料和污物。在油浸下分别测定镜质体最大反射率和随机反射率,显微镜光度计符合MT/T 1053—2008中的技术要求,误差小于0.01%。⑤碳同位素测试流程为:样品除去表面污染后,粉碎至120目,酸溶除去样品中的碳酸盐矿物,将残渣在真空状态下加热,收集得到的气体在Isoprime型同位素质谱仪上测试。碳同位素测试标准为GBW04405,测试数据按碳同位素国际标准(PDB标准)计算,标准偏差 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

此外对筛选出的5件泥岩样品和3件含油砂岩进行了饱和烃和芳烃气相色谱-质谱(GC-MS)分析。首先将样品粉碎至80目进行72h索氏抽提,沉淀沥青质后,采用硅胶/氧化铝柱色谱分离法进行族组分分离,分别用正己烷、二氯甲烷/正己烷(体积比3:1)及二

氯甲烷/甲醇(体积比2:1)洗脱,得到饱和烃、芳烃和非烃组分。然后对饱和烃和芳烃进行色谱-质谱(GC-MS)联用仪分析。饱和烃气相色谱部分:进样口温度300℃,载气为He气(99.999%),载气流速为1.0 mL/min。进样方式为不分流进样。色谱柱:HP-5MS(60m,0.25mm,0.25 μm)程序升温,初温为50℃,保留1min,然后以20℃/min的速度升至120℃,再以3℃/min升至310℃,保留25min。饱和烃质谱部分:EI电离源,电离电压为70eV,获取数据方式为全扫描与选择离子同时进行。芳烃气相色谱部分:进样口温度300℃,载气为He气(99.999%),载气流速为1.0 mL/min。进样方式为不分流进样。色谱柱:HP-5MS(60m,0.25mm,0.25 μm)程序升温,初温80℃,保留1min,然后以3℃/min的速率升至310℃,保留16min。芳烃质谱部分:EI电离源,电离电压为70eV,获取数据方式为全扫描与选择离子同时进行。饱和烃和芳烃的色谱分析均在中国石油大学(北京)用Agilent 6890GC-5975iMS气相色谱-质谱(GC-MS)联用仪完成。

3 烃源岩地球化学特征

3.1 有机质丰度

松江盆地白垩系长财组泥岩样品有机质丰度较高,所测试的4件泥岩样品有机碳含量为0.54%~6.10%,平均为2.89%,除一件样品为中等外,其余样品均达到了好-极好的生油岩标准;氯仿沥青“A”为0.1182%~0.1461%,平均为0.095%,为中等-好的生油岩。 $S_1+S_2=2.04\sim 21.62\text{ mg/g}$,平均为11.74 mg/g,也达到了较好的生油岩标准^[6]。故除了一个样品为中等以外,长财组其余样品均达到了较好-好的生油岩标准,为本区较优质烃源岩(表1)。

大砬子组泥岩样品有机质丰度优于长财组,有机碳含量为2.90%~5.10%,平均为3.82%。生油岩标准达到了非常好-极好;氯仿沥青“A”为0.0445%~0.2473%,平均为0.14%,也达到了好的生油岩标准。 $S_1+S_2=8.99\sim 27.95\text{ mg/g}$,平均为18.13 mg/g,为好的生油岩。故大砬子组所有样品均达到了好-极好的生油岩标准,为本区最优质的烃源岩。

3.2 有机质类型和成熟度

根据有机质显微组分和热解分析可知:长财组烃源岩有机显微组分以腐泥组的无定型体为主,其类型系数介于9.00~34.25, $\delta^{13}\text{C}$ 的平均含量为-27.06‰,

表 1 松江盆地烃源岩有机地化分析数据

Table 1 Organic geochemical analysis of source rocks in the Songjiang Basin

层位	采样地点	样品号	岩性	TOC/%	氯仿沥青 “A”含量/%	(S ₁ + S ₂)/ (mg · g ⁻¹)	氢指数/ (mg · g ⁻¹)	T _{max} /℃	R _o %
K ₁ d ²	两江镇	SJS02-2	泥岩	2.896	0.044 5	8.986	305.8	434	1.015
	茂朱村西	SJS05-1	泥岩	2.915	0.146 2	15.838	520.8	437	1.004
	东山村东	SJS10-2	泥岩	4.375	0.124 7	19.742	441.8	434	0.968
	东光村	SJS14-2	泥岩	5.097	0.247 3	27.951	539.2	437	0.946
K ₁ c ²	茂朱村东	SJS05-3	泥岩	1.628	0.020 6	2.043	120.4	442	1.018
	西屯西	SJS18-1	泥岩	3.279	0.146 1	11.580	345.3	437	0.927
	腰团村	SJS19-2	泥岩	0.542	0.008 0	0.261	38.4	445	0.959
K ₁ c ¹	永丰村	SJS12-2	泥岩	6.103	0.118 2	21.620	350.4	442	0.966

表 2 松江盆烃源岩有机显微组分含量与有机质类型划分

Table 2 Content of organic macerals and classification of organic matters of source rocks, Songjiang Basin

样品号	岩性	腐泥组/%			壳质组/%				镜质组/ %	惰质组/ %	腐泥组 颜色	类型系数	类型
		无定形	藻质体	合计	孢粉体	腐殖无定形体	其他	合计					
SJS02-2	泥岩	63	0	63	1	0	1	1	21	15	棕黄	32.75	Ⅱ ₂
SJS05-1	泥岩	68	0	68	0	0	0	0	12	20	棕黄	39.00	Ⅱ ₂
SJS10-2	泥岩	68	0	68	0	0	0	0	18	14	棕黄	40.50	Ⅱ ₁
SJS14-2	泥岩	78	0	78	0	0	0	0	14	8	棕黄	59.50	Ⅱ ₁
SJS05-3	泥岩	64	0	64	0	0	0	0	25	11	棕黄	34.25	Ⅱ ₂
SJS18-1	泥岩	56	0	56	0	0	0	0	28	16	棕黄	19.00	Ⅱ ₂
SJS19-2	泥岩	60	0	60	0	0	0	0	29	11	棕黄	27.25	Ⅱ ₂
SJS12-2	泥岩	50	0	50	0	0	1	1	30	19	棕黄	9.00	Ⅱ ₂

氢指数为 38.4 ~ 350.4 mg/g,均值为 213.6 mg/g,干酪根类型为Ⅱ₂型(表 2),属于生烃中等-差的产气-油的有机质类型。长财组样品的 R_o 为 0.93% ~ 1.02%,平均测点数为 21,平均标准偏差为 ±0.09%。T_{max} 值为 437 ~ 445 ℃,均值为 441.5 ℃,表明样品已处于低熟-成熟的生油阶段^[7](图 2)。

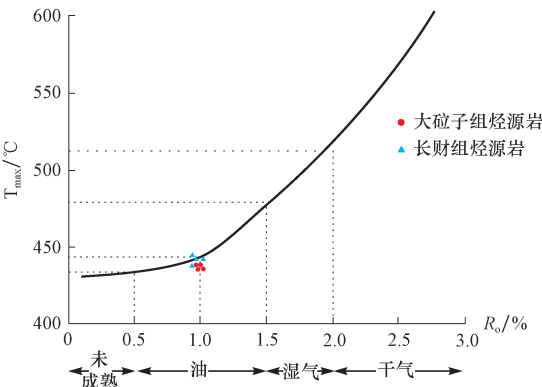


图 2 松江盆地烃源岩 R_o 与 T_{max} 相关图

Fig. 2 Correlation of pyrolysis R_o and T_{max} of source rocks, Songjiang Basin

大碰子组烃源岩有机显微组分以腐泥组的无定型体为主,其类型系数为 32.75 ~ 59.50, δ¹³C 平均含量为 -27.58‰,氢指数为 305.8 ~ 520.8 mg/g,均值为 451.8 mg/g,干酪根类型为Ⅱ₁ - Ⅱ₂型,属于生烃中等的产油-气的有机质类型。大碰子组样品的 R_o 为 0.95% ~ 1.02%,平均测点数为 19,平均标准偏差为 ±0.11%。T_{max} 值为 434 ~ 437 ℃,均值为 435.5 ℃,也达到了低成熟-成熟阶段,故松江盆地所有样品均处于低熟-成熟的生油阶段。

3.3 生物标志化合物特征

3.3.1 长财组烃源岩

长财组烃源岩可分为 3 类,第Ⅰ类烃源岩正构烷烃碳数分布范围为 nC₁₃—nC₃₅,主峰碳为 nC₃₁,主峰碳偏后,轻重比 ΣnC₂₁₋/ΣnC₂₂₊ = 0.32,表明其生烃母质以陆源高等植物为主,Pr/Ph 为 2.91,缺乏 β 胡萝卜烷,为弱氧化的沉积环境^[8]。三环萜烷丰度较低,Σ三环/Σ五环 = 0.05。18α(H) - 22,29,30 三降藿烷(Ts) 丰度明显低于 17α(H) - 22,29,30 三降藿烷(Tm),伽马

蜡烷含量较低,伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷=0.069,表明母质的沉积环境水体盐度较低,为淡水-微咸水沉积^[9](图3)。重排甾烷较丰富,规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 呈 $C_{28} < C_{27} \ll C_{29}$ 的反“L”型分布,奥利烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷=0.012,也印证了母源以高等植物为主^[10](图4)。规则甾烷 $C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta) = 0.36$ 。 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R) = 0.6$,已处于成熟阶段^[11](图5a)。

第Ⅰ类烃源岩芳烃化合物中菲系列化合物含量最高,为48%,屈系列次之,为19%,此外荧蒽系列含量也较高,峰型为前峰型。荧蒽系列化合物和屈系列化合物中较高含量的惹烯、荧蒽、芘和芘等化合物也指示了高等植物的输入^[12]。硫芴系列/氧芴系列=0.38,也验证了弱还原-弱氧化环境的沉积环境^[13-14]。三

芳甾烷 $(C_{20} + C_{21}) / (C_{20} + C_{21} + C_{26} + C_{27} + C_{28}) = 0.41$,说明已经处于成熟阶段^[15-16]。

长财组第Ⅱ类烃源岩与第Ⅰ类烃源岩十分相似,其烃源岩正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{12} - nC_{33}$,主峰碳为 nC_{21} 。姥鲛烷含量较相邻的 nC_{17} 正构烷烃明显偏高, $Pr/nC_{17} = 0.95$, $Ph/nC_{18} = 0.33$,说明正构烷烃发生了生物降解,长链正构烷烃丰度降低,出现主峰碳前移现象^[17]。 Pr/Ph 为3.24,缺乏 β 胡萝卜素,为偏氧化的环境。三环萜烷丰度较高, Σ 三环/ Σ 五环=0.14,伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷=0.072,表明母质的沉积环境水体盐度较低。奇数碳优势明显, $OEP = 1.43$, $CPI = 1.57$ 。规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 呈 $C_{28} < C_{27} \ll C_{29}$ 的反“L”型分布,表明生烃环境为以高等植物为主的陆源沉积。甾烷 $C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta) = 0.27$, $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R) = 0.35$,已处于低成熟-成熟阶段(图5b)。

第Ⅱ类烃源岩芳烃化合物中仍以菲系列含量最高,屈系列次之,此外荧蒽系列含量也较高,峰型为前峰型。三芴系列中,硫芴系列/氧芴系列=0.12,较第Ⅰ类烃源岩更加氧化,为水体较浅的河流三角洲或煤系沼泽沉积。三芳甾烷 $(C_{20} + C_{21}) / (C_{20} + C_{21} + C_{26} + C_{27} + C_{28}) = 0.11$,表明成熟度为低成熟-成熟。

第Ⅲ类烃源岩正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{11} - nC_{36}$,呈双峰分布,主峰碳为 nC_{31} 。奇数碳优势较明显。由于生物降解作用,姥鲛烷和植烷丰度均明显大于其相邻的 nC_{17} 和 nC_{18} 。轻重比 $\Sigma nC_{21-} / \Sigma nC_{22+} = 0.15$,奥利烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷=0.02,规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 呈 $C_{28} < C_{27} < C_{29}$ 的反“L”型分布,结合正构烷烃和规则甾烷分布,表明生烃母质以陆生高等植物为主。 Pr/Ph 为0.50, β 胡萝卜素含量特别丰富,伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷=0.71,异常高的 β 胡萝卜素和伽马蜡烷含量表明沉积环境为咸水沉积^[18-19](图5c)。而较高的陆源高等植物碎屑的输入,也反映了沉积前期气候比较湿润,植被相对繁盛。后期逐渐变得干旱,水体盐度不断增加^[20]。

第Ⅲ类烃源岩芳烃化合物中三芳甾烷系列含量最为丰富,可达85%,为后峰型,显示了较咸化水沉积环境。三芳甾烷 $(C_{20} + C_{21}) / (C_{20} + C_{21} + C_{26} + C_{27} + C_{28}) = 0.028$,已经处于低成熟阶段。

3.3.2 大叵子组烃源岩

大叵子组烃源岩均来自于大叵子组上段。大叵子组烃源岩正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{13} - nC_{35}$,主峰碳为 nC_{28} 或 nC_{30} ,由于生物降解作用,姥鲛烷和植烷丰

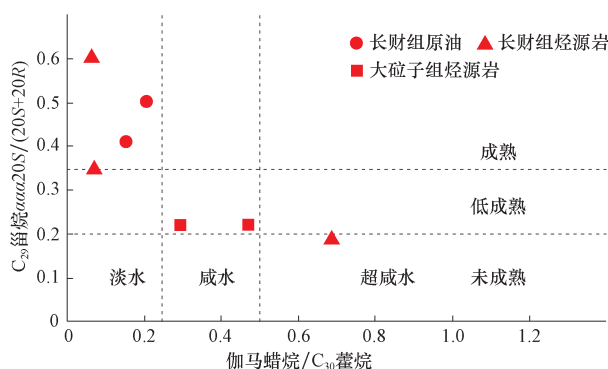


图3 松江盆地样品伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷和 C_{29} 规则甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 相关图

Fig. 3 Correlation of gammacerane/ C_{30} hopane and C_{29} regular sterane $20S/(20S + 20R)$ for samples from the Songjiang Basin

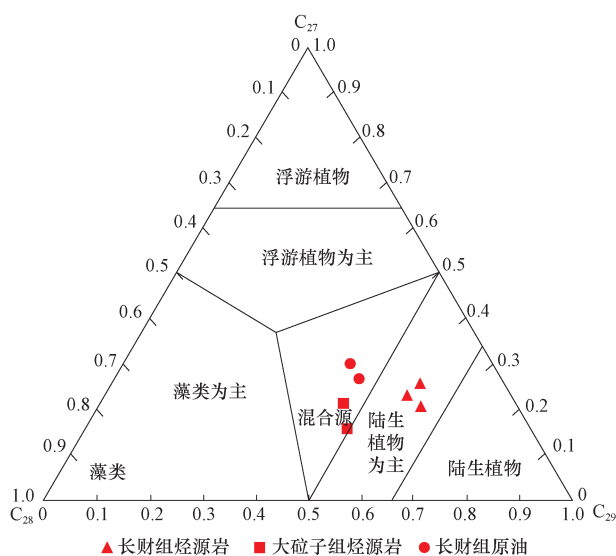


图4 松江盆地样品 $C_{27} - C_{28} - C_{29}$ 规则甾烷分布三角图

Fig. 4 Ternary diagram of C_{27} , C_{28} and C_{29} regular sterane distribution of samples from the Songjiang Basin

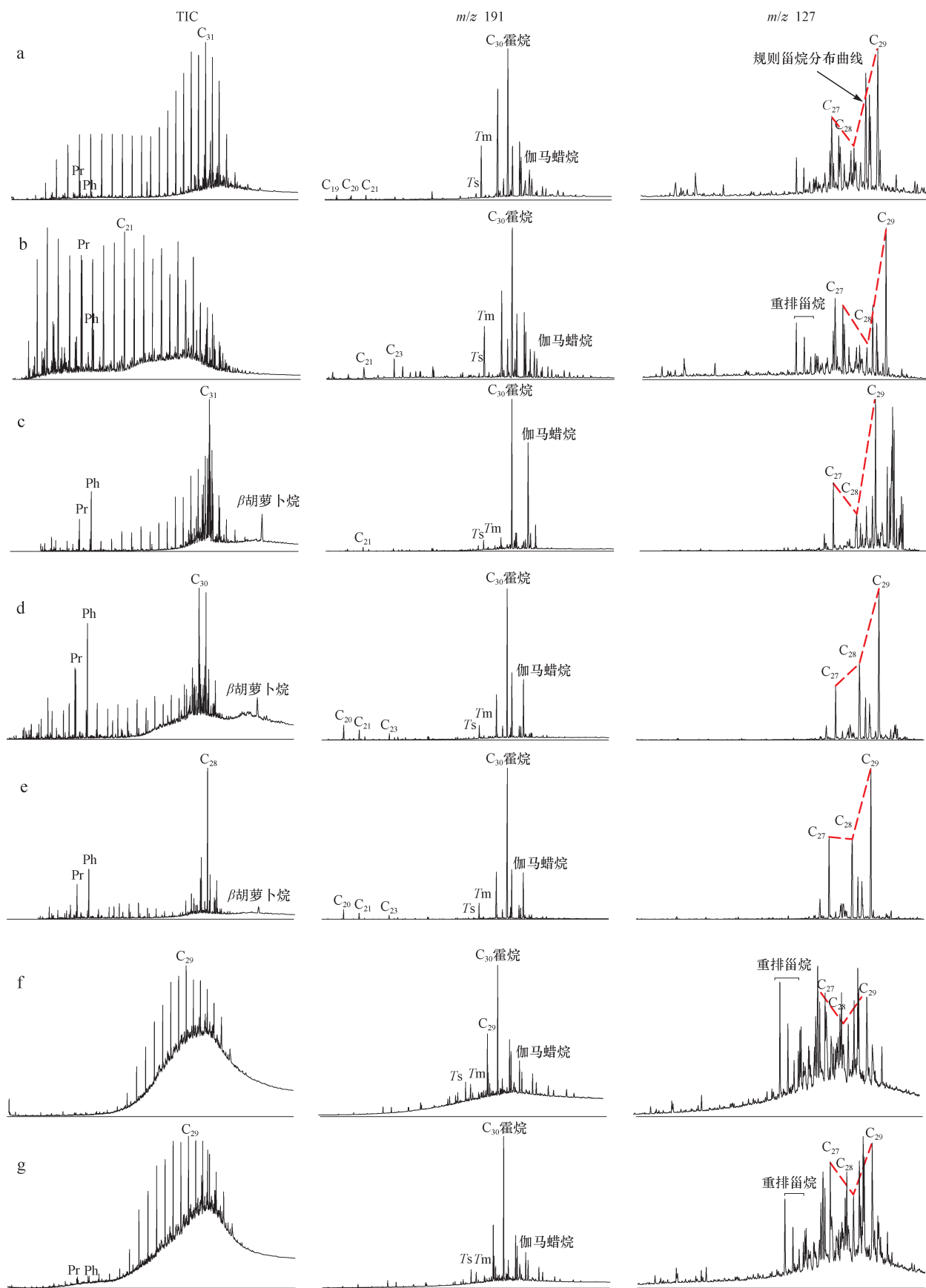


图5 松江盆地烃源岩及原油生物标志化合物特征图谱

Fig. 5 Characteristic pattern of biomarker compounds of the source rocks and crude oil in the Songjiang Basin

a,b,c. 长财组烃源岩;d,e. 大砣子组烃源岩;f,g. 长财组原油

度均明显增大,大于相邻的 nC_{17} 和 nC_{18} 。对于只经历过热演化的有机质,其藿烷 $C_{31}\alpha\beta 22S/22(S+R)$ 值应同步于其甾烷 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20(S+R)$ 值^[21]。大砷子组烃源岩藿烷 $C_{31}\alpha\beta 22S/22(S+R)$ 值均大高于其甾烷 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20(S+R)$ 值,比值为 2.33~2.45,也验证了大砷子组烃源岩经历了一定程度的生物降解,降解级别可用二者比值大小判定。规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 呈 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 的阶梯状分布,表明母质以高等植物和水生微生物混源。Pr/Ph 为 0.59~0.61, β 胡萝卜烷较丰富,伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷 = 0.28~0.54,指示咸化的还原环境。规则甾烷 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta) = 0.20 \sim 0.22$ 。 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S + 20R) = 0.21 \sim 0.22$,已处于低成熟阶段(图 5d,e)。

大砷子组烃源岩芳烃组分中,萘和菲含量均较丰富,萘为 20%~21%,菲为 26%~32%,三芳甾烷含量高,为 41%~47%,峰型为双峰。三芳甾烷 $(C_{20} + C_{21})/(C_{20} + C_{21} + C_{26} + C_{27} + C_{28}) = 0.021 \sim 0.023$,也表明已经处于低成熟阶段。较高的三方甾烷含量和高的硫芴/氧芴比值(0.50~0.57)也验证了较为咸化的还原环境。

4 原油生物标志化合物特征和油源对比

4.1 长财组原油

长财组原油遭受了一定程度的生物降解,正构烷烃呈单峰分布,碳数分布范围为 C_{13} — C_{36} ,主峰碳为 C_{29} 。正构烷烃图谱已不完整,有代表性的 Pr 和 Ph 在色谱图上已无法识别,样品饱和烃总离子流图上均出现 UCM 峰鼓包。但甾烷萜烷化合物较完整,甾烷异构体中抗生物降解的能力从差到强的顺序为: $\alpha\alpha\alpha 20R, \alpha\alpha\alpha 20S, \alpha\beta\beta 20R, \alpha\beta\beta 20S$,长财组原油中这 4 项的比值为 1:1.2:1:1.4,可知甾烷的微生物降解程度并不强烈^[22]。且未检测到明显的 25-降藿烷系列($C_{29}-25$ -降- $17\alpha(H), 21\beta(H)$ -藿烷)^[23],故长财组原油的降解级别可达中等(4~5 级)^[24]。

长财组原油可分为两类,长财组下段原油中五环三萜含量丰富,三环萜含量较低, Σ 三环萜/ Σ 五环萜 = 0.079。升藿烷(C_{31}) $22S/(22R + 22S) = 0.543$,说明已经进入成熟生油阶段。表征成熟度的 Ts/Tm 为 0.96,也验证了这一结论。缺乏 β 胡萝卜烷,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷 = 0.20,为淡水环境沉积。甾烷/藿烷 = 0.21,较低的甾烷/藿烷比值指示了微生物改造的有机质或陆源有机质的贡献^[25]。重排甾烷/规则甾烷 = 0.13,低的重排甾烷含量说明对应的烃源岩为泥

岩,而非碳酸盐岩^[26]。长财组下段样品中规则甾烷呈反“L”型分布, $C_{28} \approx C_{27} < C_{29}$,说明母质来源为混合型,且高等植物贡献大于藻类和浮游植物(图 5f)。

长财组下段原油中芳烃以菲系列,三芳甾烷系列化合物为主,分别占可定性芳烃化合物总量的 35.9% 和 39.5%,峰型为双峰型。三芳甾烷 $C_{26}20S/C_{28}20S = 0.35$,表明形成环境为淡水,微咸水环境。三芳甾烷 $(C_{20} + C_{21})/(C_{20} + C_{21} + C_{26} + C_{27} + C_{28}) = 0.04$,也验证了为低成熟-成熟原油。

长财组上段原油与长财组下段原油甾烷分布十分相似, Σ 三环萜/ Σ 五环萜 = 0.12,升藿烷(C_{31}) $22S/(22R + 22S) = 0.53$,说明已经进入成熟生油阶段。伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷 = 0.16,为淡水环境。甾烷/藿烷 = 0.51,中等的甾烷/藿烷比值指示了高等植物或微生物改造的有机质的贡献。重排甾烷/规则甾烷 = 0.20,表明对应的烃源岩仍为泥岩。规则甾烷呈反“L”型分布, $C_{28} < C_{27} < C_{29}$,说明生烃母质为混合来源。(图 5g)。

长财组上段原油芳烃中三芳甾烷系列丰度显著大于菲系列的丰度,峰型偏后峰型。三芳系列中氧芴含量较丰富,三芳甾烷 $C_{26}20S/C_{28}20S = 0.37$,为弱还原-氧化的淡水、微咸水沼泽沉积。

4.2 大砷子组原油

大砷子组原油中非烃和沥青质含量较高,样品中含有粘度较大的溶剂或复杂的混合物,饱和烃含量较低,饱和烃色谱图中基线飘起严重,对各个峰型的识别已不准确,故不能依据饱和烃色谱图进行分析。

大砷子组原油的芳烃识别程度好于饱和烃,可识别芳烃组分中,芴系列含量最高,占 31.3%,在三芳系列中可占 83%。另外是萘系列和联苯系列含量较高,相对含量分别为 25.4%,26.0%。在高等植物输入为主的陆源有机质中含有较丰富的 1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘化合物。样品中这两种化合物的含量分别为 3.2% 和 3.6%,略低于以高等植物为主要生源的陆相原油,生烃母质为陆源高等植物和低等水生生物混源^[27]。二苯并噻吩/菲 = 0.062,表明形成于还原的沉积环境^[28]。

4.3 油源对比

长财组第 I 类和第 II 类烃源岩饱和烃甾烷分布基本一致,芳烃系列中均以菲系列含量最高,以高的 Pr/Ph,低丰度的伽马蜡烷和 β 胡萝卜烷区别于第 III 类烃源岩和大砷子组烃源岩(图 5)。结合图 3 和图 4 投

点可知,二者成熟度接近,生烃母质均以陆生高等植物为主,为淡水环境沉积,应属于同一大类,为相同或相似烃源岩;长财组上、下段的原油虽都经历了一定程度的降解,但二者饱和烃正构烷烃和甾萜烷分布基本一致,伽马蜡烷和 β 胡萝卜素烷丰度很低;芳烃系列中均含有较高丰度的三芳甾烷,以低的芴系列和二苯并噻吩丰度区别于大砬子组原油。二者成熟度相似,均为高等植物和水生微生物混源的淡水沉积,应属于同一大类,具有相同或相似油源。结合长财组的生油模式为自生自储的互层式进行精确对比,长财组上段原油应来自长财组中第Ⅰ类烃源岩,长财组下段原油三芴系列中氧芴丰度更高,形成的环境更加氧化,来自于长财组第Ⅱ类烃源岩。

大砬子组烃源岩中伽马蜡烷和 β 胡萝卜素烷均较丰富,为咸水沉积,以混源的生烃母质和还原的沉积环境区别于长财组烃源岩。大砬子组原油芳烃组分中芴系列、萘系列和联苯系列较丰富,为混源的还原环境沉积,与其具有一定相似性。结合大砬子组生油模式为上生下储式,偏还原的大砬子组原油来自于大砬子组上部烃源岩。

5 结论

1) 松江盆地白垩系烃源岩有机质丰度高,有机质类型为Ⅱ₁ - Ⅱ₂型,已处于低成熟 - 成熟阶段。总体具有较好的生烃潜力,其中大砬子组生烃潜力好于长财组。

2) 长财组烃源岩可分为3类,第Ⅰ类生烃母质以陆源高等植物为主,为弱氧化的淡水沉积,已处于成熟阶段;第Ⅱ类沉积环境更为氧化,为水体较浅的河流三角洲或含煤沼泽沉积;第Ⅲ类伽马蜡烷和 β 胡萝卜素烷丰度为所有样品中最高,指示咸化的盐湖环境;大砬子组烃源岩以高的 β 胡萝卜素烷、伽马蜡烷和三芳甾烷,低的姥植比为特征,为咸化的还原环境沉积,生烃母质为混合来源。

3) 长财组原油可分为两类。长财组下段原油芳烃图谱为双峰型,母质类型为高等植物和水生微生物混源,成熟度中等,为淡水、微咸水湖相沉积;长财组上段原油芳烃图谱为后峰型,三芴系列中氧芴含量较下段原油更加丰富,为弱还原 - 弱氧化的沼泽沉积。大砬子组原油芳烃图谱为双峰型,三芴系列中的芴系列含量很高,形成于还原环境。经油源对比可知,长财组上段原油来自长财组中第Ⅰ类烃源岩,长财组下段原油形成环境更加氧化,来自于第Ⅱ类烃源岩,偏还原的

大砬子组原油来源于大砬子组上段烃源岩。

参 考 文 献

- [1] 董清水, 聂辉, 陶高强, 等. 吉林省松江盆地白垩统烃源岩地球化学特征及油气勘探前景[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增刊): 52 - 59.
Dong Qingshui, Nie Hui, Tao Gaoqiang, et al. Geochemistry characteristics and hydrocarbon exploration perspective of Lower Cretaceous source rock in the Songjiang Basin, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University: Edition of Earth Science, 2012, 42(Suppl.): 52 - 59.
- [2] 高宁宁. 松江盆地构造演化与中生界油气成藏潜力分析[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2016.
Gao Ningning. Analysis of tectonic evolution and hydrocarbon accumulation potential of Mesozoic in Songjiang Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [3] 杜江峰, 刘招君, 张雷, 等. 吉林松辽盆地早白垩世大砬子组沉积特征及演化[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 61 - 69.
Du Jiangfeng, Liu Zhaojun, Zhang Lei, et al. Sedimentary characteristics and evolution of early Cretaceous Dalazi Formation in Songjiang Basin, Jilin Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 61 - 69.
- [4] 张雷, 刘招君, 杜江峰, 等. 吉林省松江盆地白垩统大砬子组油页岩特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(6): 997 - 1000.
Zhang Lei, Liu Zhaojun, Du Jiangfeng, et al. Characteristics of the oil shale of the Lower Cretaceous Dalazi Formation in the Songjiang Basin, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University: Edition of Earth Science, 2006, 36(6): 997 - 1000.
- [5] 张雷, 刘招君, 杨婷, 等. 吉林省松江盆地白垩统大砬子组上段浊积岩沉积特征及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(3): 44 - 50.
Zhang Lei, Liu Zhaojun, Yang Ting, et al. Turbidites from the upper member of the Lower Cretaceous Dalazi Formation in the Songjiang Basin, Jilin and their geological implications [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(3): 44 - 50.
- [6] 吴文祥, 张海翔, 李占东, 等. 层序地层地球化学方法在烃源岩评价中的应用——以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 701 - 710.
Wu Wenxiang, Zhang Haixiang, Li Zhandong, et al. Sequence stratigraphic geochemistry and its application in evaluation of source rocks: Taking Beier sag of Hailar Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 701 - 710.
- [7] 杨树春, 卢庆治, 宋传真, 等. 库车前陆盆地中生界烃源岩有机质成熟度演化及影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 770 - 777, 785.
Yang Shuchun, Lu Qingzhi, Song Chuanzhen, et al. Evolution of Mesozoic source rock's organic maturation in Kuqa foreland basin and its influence factors [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 770 - 777, 785.
- [8] Tissot B, Welte D. Petroleum Formation and Occurrence [M]. Springer, New York, 1984: 699.
- [9] Peters K E, Moldovan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molec-

- ular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [J]. Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, 01 (01): 363.
- [10] El diasty WS, El beialy S, Mahdi A, et al. Geochemical characterization of source rocks and oils from northern Iraq: Insights from biomarker and stable carbon isotope investigations [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77 (19): 1140 – 1162.
- [11] 宋一涛, 廖永胜, 王忠. 淮北凹陷孔店组烃源岩评价及油源分析 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (4): 487 – 493.
- Song Yitao, Lao Yongsheng, Wang Zhong. Evaluation of source rocks in Kongdian Formation and analysis of oil sources in Weibei sag [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (4): 487 – 493.
- [12] 曹新星, 李艳, 王丽, 等. 松辽盆地上白垩统嫩江组三四段沉积有机质及多环芳烃化合物组成分布与古气候意义 [J]. 地球化学, 2015, 44 (6): 536 – 545.
- Cao Xinxing, Li Yan, Wang Li, et al. The distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Upper Cretaceous Nenjiang Formation of Songliao Basin and its paleoclimate significance [J]. Geochimica, 2015, 44 (6): 536 – 545.
- [13] 李水福, 何生. 原油芳烃中三芴系列化合物的环境指示作用 [J]. 地球化学, 2008, 37 (1): 45 – 50.
- Li Shuifu, He sheng. Geochemical characteristics of dibenzothiophene dibenzofuran and fluorine and their homologues and their environmental indication [J]. Geochimica, 2008, 37 (1): 45 – 50.
- [14] 刘显阳, 赵彦德, 王飞, 等. 鄂尔多斯盆地西南部三叠系和侏罗系原油芳烃化合物特征与意义 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2015, 51 (1): 1 – 6.
- Liu Xianyang, Zhao Yande, Wang Fei, et al. Composition characteristics and significance of aromatic compounds in crude oils from Triassic and Jurassic reservoir in Southwestern Ordos Basin [J]. Journal of Lanzhou University: Edition of Earth Science, 2015, 51 (1): 1 – 6.
- [15] 贺训云, 蔡春芳, 姚根顺, 等. 黔南坳陷油苗来源: 碳、硫同位素及生物标志物证据 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (3): 1059 – 1072.
- He Xunyun, Cai Chunfen, Yao Genshun, et al. Origins of oil seepages in the southern Guizhou Depression, SW China: Evidence from carbon isotopes, sulfur isotopes and biomarkers [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (3): 1059 – 1072.
- [16] 张宝收, 李美俊, 赵青, 等. 原油中 C_{26} – C_{28} 三芳甾烷相对含量计算方法及其应用 [J]. 石油实验地质, 2016, 38 (5): 692 – 697.
- Zhang Baoshou, Li Meijun, Zao Qing, et al. Determining the relative abundance of C_{26} – C_{28} triaromatic steroids in crude oils and its application in petroleum geochemistry [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38 (5): 692 – 697.
- [17] 刘全有, 刘文汇. 塔里木盆地煤岩生物降解的生物标志化合物证据 [J]. 石油学报, 2007, 28 (1): 50 – 53.
- Liu Quanyou, Liu Wenhui. Biomarker evidences of biodegradation for Jurassic coal in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28 (1): 50 – 53.
- [18] Jiang Z, Fowler M. Carotenoid-derived Alkanes in Oils From Northwestern China [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10 (4): 831 – 839.
- [19] 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生界咸水湖相烃源岩和原油生物标志物组合特征 [J]. 沉积学报, 1998, 16 (3): 119 – 123, 131.
- Zhang Huanzhi, Yang Fan, Li Dongming, et al. Characteristics of biomarkers of source rocks and crude oil in the Cenozoic saltwater lakes in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16 (3): 119 – 123, 131.
- [20] 蒲阳, 张虎才, 陈光杰, 等. 干旱盆地古湖相沉积物生物标志物分布特征及环境意义——以柴达木盆地为例 [J]. 中国沙漠, 2013, 07 (4): 1019 – 1026.
- Pu Yang, Zhang Hucui, Chen Guangjie, et al. Distribution characteristics and environmental significances of biomarker in paleolake sediments of Arid Basin: A case study in the Qaidam Basin [J]. Journal of Desert Research, 2013, 07 (4): 1019 – 1026.
- [21] 王作栋, 孟仟祥, 房嫒, 等. 低演化烃源岩有机质微生物降解的生物标志物组合特征 [J]. 沉积学报, 2010, 28 (6): 1244 – 1249.
- Wang Zuodong, Meng Qianxiang, Fang Huan, et al. The combination characteristics of the biomarkers of microbial degradation of organic matter in low-evolution source rock [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28 (6): 1244 – 1249.
- [22] 陈中红, Moldowan J, 刘昭茜. 东营凹陷生物降解稠油甾烷分子的选择性蚀变 [J]. 地球科学进展, 2012, 27 (10): 1108 – 1114.
- Chen Zhonghong, M Moldowan, Liu Zhaoqian. Selective alteration of steranes in heavy biodegraded oils from Dongying Sag [J]. Advances In Earth Science, 2010, 28 (6): 2012, 27 (10): 1108 – 1114.
- [23] Peters K E, Moldowan J M, Maccaffrey M A, et al. Selective Biodegradation of extended hopanes to 25 – norhopanes in petroleum reservoirs: insights from molecular mechanics [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24 (8): 765 – 783.
- [24] 倪春华, 包建平, 王鹏辉, 等. 生物降解原油的油源对比研究新进展 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26 (6): 109 – 112.
- Ni Chunhua, Bao Jianping, Wang Penghui, et al. Novel progress on source correlation of biodegraded crude oil [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26 (6): 109 – 112.
- [25] Tissot B, Durand B, Espitalie J, et al. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58 (3): 499 – 506.
- [26] Dzou L I, Holba A G, Ramón J C, et al. Application of new diterpane biomarkers to source, biodegradation and mixing effects on central Llanos Basin oils, Colombia [J]. Organic Geochemistry, 1999, 30 (7): 515 – 534.
- [27] 丁安娜, 惠荣耀, 张中宁. 准噶尔盆地白家海凸起湖相原油与烃源岩芳烃地球化学特征 [J]. 石油勘探与开发, 1997, 24 (3): 15 – 20, 97.
- Ding Anna, Hui Rongyao, Zhang Zhongning. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of Source Rocks and Lakeside oil in Baijiahai, Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and development, 1997, 24 (3): 15 – 20, 97.
- [28] Hughes W B, Holba A G, Dzou L I. 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.

(编辑 张玉银)