

doi:10.3799/dqkx.2015.089

东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源

苏 奥^{1,2}, 陈红汉^{2*}

1. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司研究院, 河北涿州 072750
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 东海盆地西湖凹陷具有大量的原油资源,但对于原油成因讨论较少。采集西湖凹陷多个油样和岩样,利用气相色谱和傅里叶红外光谱等手段,全面分析了该区烃源岩和原油的地球化学特征,综合讨论了原油来源以及凝析油和高蜡轻质油的成因。研究表明,平湖组煤系源岩均处于热演化的成熟阶段,其中碳质泥岩和煤岩以陆源生物为主要生源,其干酪根类型为Ⅲ型,暗色泥岩则具有陆源生物和水生生物双重生源贡献,其干酪根类型Ⅱ-Ⅲ型,同时碳质泥岩和煤的生油潜力远高于泥岩。原油主要为凝析油和轻质油,凝析油具有低密度、低蜡等“六低一高”的特点,轻质油具有高蜡特质,而且轻烃组分有明显差异。生标参数显示大部分原油为腐殖型,少部分原油表现出具有腐殖和腐泥母质的特点,同时该区原油均处于中等成熟阶段。油油对比和油岩对比表明大部分油来自平湖组碳质泥岩和煤岩,具有典型Ⅲ型腐殖油的特征;少部分油来自暗色泥岩,具有Ⅱ-Ⅲ型油的特征(总体上仍偏腐殖型)。凝析油和轻质油的物性及轻烃组分的差异与源岩母质无关。凝析油是干酪根在成熟演化阶段生成的原油遭受蒸发分馏作用的结果,高蜡轻质油除了是“蒸发分馏作用”的残余油外,还有部分是“混合作用”的结果。

关键词: 西湖凹陷;地球化学;油源;成因;石油地质。

中图分类号: P618 文章编号: 1000-2383(2015)06-1072-11 收稿日期: 2014-07-23

Geochemical Characteristics of Oil and Source Rock, Origin and Genesis of Oil in Xihu Depression, East China Sea Basin

Su Ao^{1,2}, Chen Honghan^{2*}

1. *Geophysical Research Institute, CNPC Geophysical Company Limited, Zhuozhou 072750, China*
2. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

Abstract: There are plenty of oil in Xihu depression of East China Sea basin, however, few scholars pay attention to the origin and genesis of oil. The samples of source rocks and oil were measured by gas chromatography and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and the origin of oil and genesis of condensate and high-wax light oil are discussed based on the analysis of geochemical characteristics. The results suggest that coal measure source rocks of the Pinghu Formation are at the mature stage of thermal evolution. Carbonaceous mudstone and coal mainly came from terrestrial organism, with kerogen type Ⅲ. Dark mudstone mainly came from both terrestrial organism and aquatic organism, with kerogen type Ⅱ-Ⅲ. Genetic potential of carbonaceous mudstone and coal is significantly higher than that of mudstone. The crude oil is mainly divided into condensate with low density and wax and high-wax light oil, and light hydrocarbon displays obvious different compositions. Most of the oil is of humic type with some oil being both humic and sapropelic. Oil is at the medium mature stage. Most oil is derived from carbonaceous mudstone and coal in the Pinghu Formation, whereas only a small amount of oil is derived from dark mudstone. Physical properties of condensate and light oil and their difference of light hydrocarbon composition are unrelated with source rocks. Condensate was produced under the evaporation fractionation effect and from the oil which had been generated from the kerogen at the mature stage. High-wax light oil is resid-

基金项目: 国家油气重大科技专项(No. 2011ZX05023-004-010).
作者简介: 苏奥(1989-),男,助理工程师,主要从事盆地流体地质与油气成藏及地球化学研究. E-mail: suao446@163.com
*** 通讯作者:** 陈红汉(1962-), E-mail: hhchen@cug.edu.cn

引用格式: 苏奥,陈红汉,2015. 东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源. 地球科学——中国地质大学学报,40(6): 1072-1082.

2013),其中烃源岩岩性主要为暗色泥岩、煤及碳质泥岩。

2 样品与测试

本次分析测试内容为气相色谱和傅里叶红外光谱测试,样品与测试条件及流程如下:

(1)本次研究共采集了西湖凹陷 28 个油样(凝析油和轻质油)和 27 个平湖组煤系源岩岩样,进行饱和烃及轻烃气相色谱测试分析。所有油样保存在茶色小玻璃瓶中,并使用锡纸密封包裹,放置于通风良好的环境中,以防止样品挥发和污染。测试所采取的仪器为美国 Thermo Finnigan 公司生产的 TRACE 型气相色谱一质谱联用仪,配备为 Agilent DB-1MS 石英毛细管色谱柱(60 m×0.20 mm×0.25 μm),载气为氮气。测试流程为:先升温至 60℃,恒温 2 min,然后以 5℃/min 的速率升至 290℃,恒温 30 min。

(2)本次研究使用了 27 个源岩岩样进行傅里叶红外光谱分析。测试流程如下:将岩样置于 50℃左右的干燥箱内烘 5 h 左右,然后取出合适重量的岩样进行充分研磨,同时使用氯仿进行抽提,得到不溶部分干酪根,然后再次低温烘干,进行红外光谱测试。测试所采用的仪器为美国 Nicolet 公司生产的 FT-IR740 型傅里叶变换红外光谱仪,分析波数范围为 4 000~50 cm⁻¹。

3 油岩地球化学特征

3.1 烃源岩的地球化学特征

3.1.1 源岩丰度和类型

在西湖凹陷已钻遇的烃

源岩有 3 套,即龙井组、花港组和平湖组烃源岩,有机质丰度依次变好。其中贾健谊等(2000)和傅宁等(2003)已证实西湖凹陷最主要的烃源层为平湖组煤系地层,钻井发现煤系地层主要由暗色泥岩组成,并夹有多而薄的煤层和碳质泥岩。源岩热解实验测试显示,平湖组暗色泥岩的热解生烃潜量(S_1+S_2)介于 0.01~21.11 mg/g,平均值为 1.61 mg/g,有机碳总量(TOC)介于 0.1%~4.9%,平均值为 1.04%;平湖组碳质泥岩的 S_1+S_2 介于 5.81~99.36 mg/g,平均值为 35.29 mg/g,TOC 介于 5.0%~29.1%,平均值为 12.6%;平湖组煤层的 S_1+S_2 则介于 5.73~215.75 mg/g,平均值为 115.26 mg/g,TOC 为 31.7%~72.9%,平均值为 51.3%。因此从生烃潜力和有机碳总量角度,煤层生烃能力最好,碳质泥岩其次,暗色泥岩最差。干酪根元素分析和氢指数结果表明,研究区平湖组有机质类型特征以Ⅱ-Ⅲ型为主。有机质显微组分显示,平湖组煤层、碳质泥岩和暗色泥岩的显微组分成分总体以镜质组和惰质组为主,腐泥组和壳质组含量较低,存在部分暗色泥岩腐泥组含量高达 50%以上。同时暗色泥岩相对于煤和碳质泥岩而言,其壳质组含量也要相对高些,可达到 15%以上,其中在壳质组中树脂体含量要高于孢粉体、木栓质体等其他成分。镜质组主要以富氢的基质为主。按照传统干酪根显微组分分类法,煤和碳质泥岩的干酪根主要以Ⅲ型为主,暗色泥岩主要为Ⅲ-Ⅱ型,但从生烃能力角度来看,前者要好于后者。一般水生生物为母质的有机质具有高碳数正构烷烃,而陆生高等生物为母质的有机质一般具有中低碳数正构烷烃,从烃源岩的气相色谱图可发现(图 2),暗色泥岩的饱和烃气相色谱谱形图具有明显的“双峰”,暗示了水生生物和陆生高等生物的双重贡献,煤岩的饱和烃气相色谱谱形图则主要以“单峰”

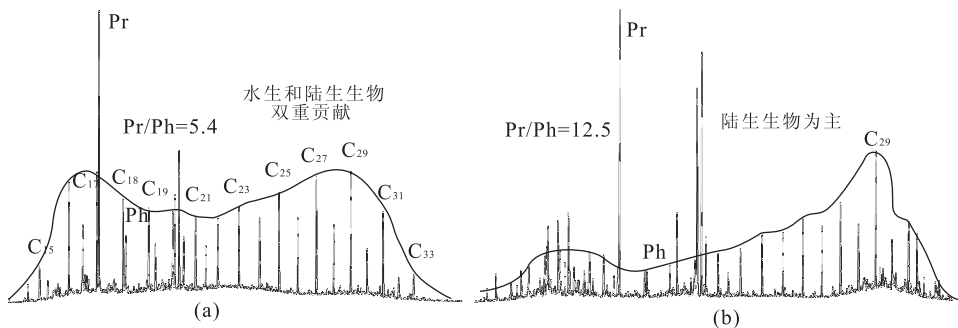


图 2 西湖凹陷典型暗色泥岩(a)和煤岩的饱和烃气相色谱(b)

Fig. 2 Gas chromatogram of saturated hydrocarbon of typical dark mudstone (a) and coal (b) in Xihu depression

a. NB25-3-1 井泥岩 3 226~3 228 m,平湖组;b. NB25-3-1 井煤 3 438~3 446 m,平湖组

为主,表明了陆地生物为主要的有机质来源,而且煤岩的 Pr/Ph 比值明显高于暗色泥岩(图 2),据统计得出煤岩和碳质泥岩的 Pr/Ph 主要介于 7~11,而暗色泥岩的 Pr/Ph 主要介于 3~7.

本文同时利用了傅里叶红外光谱仪来研究西湖凹陷干酪根的结构和类型及成熟度. 傅里叶红外光谱技术(FTIR)的测试原理在于,在连续红外光谱照射下,有机质分子可吸收振动频率相同的红外光,形成该分子的独特的光谱形态,因此能够有效反映有机质干酪根的化学结构和官能团,可被用来研究干酪根类型划分、生烃气潜力评价以及有机质成熟度确定等,具有不破坏原始物质和测试速度快等优点(李岩等,2013). 据有机化学和红外光谱学原理,本次测试的西湖凹陷干酪根红外光吸收峰主要的代表基团如下:(1) 750 cm^{-1} 、 810 cm^{-1} 、 870 cm^{-1} 和 $1\,630\sim1\,600\text{ cm}^{-1}$ 的吸收谱带,与 C=C 键有关,反映了芳香结构;(2) $1\,370\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,450\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 的吸收谱带,与脂肪结构有关;(3) $1\,700\text{ cm}^{-1}$ 主要与 C=O 键有关,反映了杂原子基团的结构(图 3). 从图 3 中可知,相近深度的暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩三者的红外光谱谱形大致上较为相似,均表现为芳烃 C=C 键吸收峰($1\,630\sim1\,600\text{ cm}^{-1}$)明显突出,同时脂族结构(CH_2 和 CH_3)吸收峰 $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 强度相对较弱,C=O 键吸收峰($1\,700\text{ cm}^{-1}$)则不明显. 而且碳质泥岩和煤的芳香族与脂肪族强度比值明显要高于暗色泥岩. 这在一定程度上反映了西湖凹陷泥岩、碳质泥岩和煤主要以陆源生物为主的母质来源,且碳质泥岩

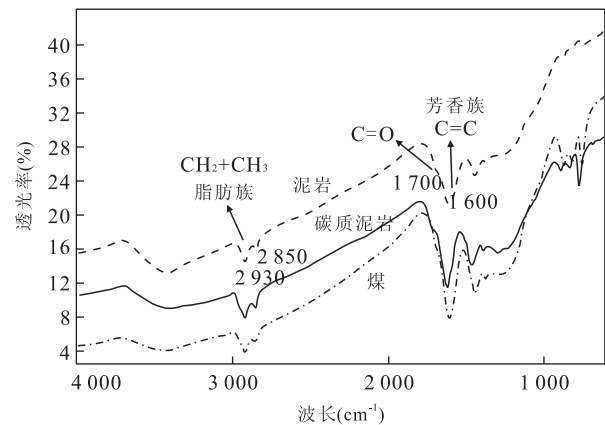


图 3 西湖凹陷平湖组相近深度泥岩、碳质泥岩和煤的红外光谱谱形

Fig. 3 Infrared spectroscopy spectrum chart of mudstone, carbonaceous mudstone and coal in similar depth in Pinghu Formation, Xihu depression

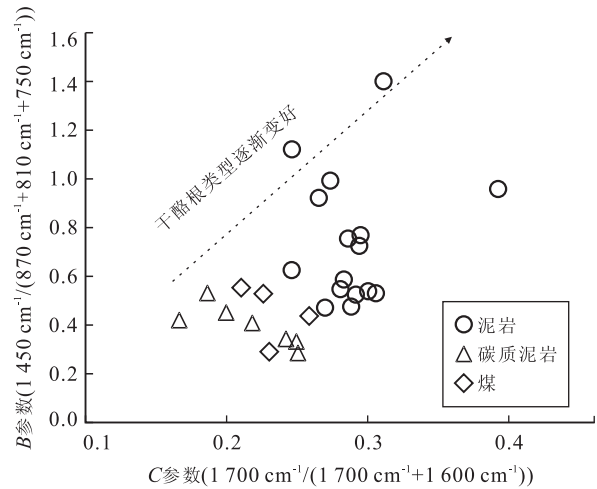


图 4 西湖凹陷平湖组泥岩、碳质泥岩和煤岩干酪根红外吸收峰强度比值分布

Fig. 4 Infrared absorption peak intensity ratio of mudstone, carbonaceous mudstone and coal in Pinghu Formation, Xihu depression

和煤比暗色泥岩具有更为明显的陆源特征.

干酪根红外光谱的某些吸收峰的强度比值可以用来表征干酪根结构,本文选取以下参数来区分不同类型的干酪根: C 参数 = $1\,700\text{ cm}^{-1} / (1\,700\text{ cm}^{-1} + 1\,600\text{ cm}^{-1})$ 和 B 参数 = $1\,450\text{ cm}^{-1} / (870\text{ cm}^{-1} + 810\text{ cm}^{-1} + 750\text{ cm}^{-1})$, 它们可以反映干酪根脂肪族和芳香族结构相对比值. 从图 4 中可以看出,碳质泥岩和煤几乎无区别,而相对而言,泥岩具有相对较多的脂类结构而少芳核结构,这与上述干酪根显微组分分析是一致的.

3.1.2 源岩热演化程度 西湖凹陷已钻遇的平湖组暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩的热解实验得到的 T_{max} 参数一般介于 $425\sim450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,显示源岩主要处于成熟阶段. 测试结果显示平湖组源岩的镜质体反射率 R_0 介于 $0.5\%\sim1.0\%$, OEP 介于 1.2 左右, 无明显的奇偶优势, $C_{29}20\text{S}/20(\text{S}+\text{R})$ 介于 $0.38\sim0.55$, $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 介于 $0.31\sim0.55$, 这些参数也均指明了源岩处于成熟阶段. 本文同时利用红外光谱参数计算了源岩的成熟度. 一般随着有机质热演化程度的增加,干酪根中的芳香核逐渐脱烷基缩聚,导致芳环稠合程度增加,使得振动体系之间的相互作用力减小,因此所需要的能量也随之减小,C=C 键吸收峰向低波长方向移动,这种现象被称做为“芳环位移律”,同时国外学者也建立了干酪根镜质体反射率与 C=C 键红外吸收最小波数 W_{min} 之间的关系 (Ganz and Kalkreuth, 1991). 本文将研究区干酪根

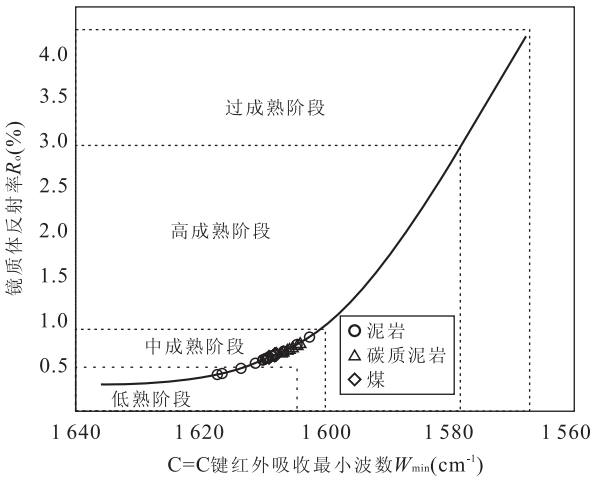


图 5 干酪根镜质体反射率与 C=C 键红外吸收最小波数 $W_{\min}$ 之间关系
Fig. 5 Diagram between kerogen vitrinite reflectance and infrared absorption minimum wave number ($W_{\min}$) of C=C bond

红外光谱测试数据投入已建立的 R_o - $W_{\min}$ 关系 (图 5), 可以发现该区除个别泥岩样品外, 大多数泥岩、碳质泥岩和煤的热演化程度均处于中成熟阶段.

3.2 原油地球化学特征

3.2.1 原油类型 西湖凹陷各油气田部分气层测试显示气油比高达 $3\,000\sim5\,000\text{ m}^3/\text{m}^3$, 部分油样实测高压物性 PVT 相图见图 6a, 这表明该区普遍存在凝析油气藏. 除此之外, 还存在常规油藏和天然气气藏. 从相态和密度来看, 该区产出原油主要可分为凝析油和轻质油, 而且两者的物理性质差异较大. 凝析油具有低密度、低蜡 ($<5\%$)、低粘度、低硫 ($<0.3\%$)、低凝固点、低胶质和沥青质含量和高轻烃含量的特点, 即“六低一高”特征; 轻质油明显密度稍高且具有高蜡的特征, 同时轻组分含量低而胶质

和沥青质含量相对较高, 其中从图 6b 可以看出, 原油密度与含蜡量呈正相关的关系, 即该区凝析油密度较低、含蜡低, 而轻质油密度稍高、含蜡量高.

从原油的轻烃组分角度来看, 本区原油的轻烃组分成分存在显著差异, 例如从平湖五井深度为 $3\,695.5\text{ m}$ 的原油和平湖四井深度为 $2\,708.6\text{ m}$ 的原油的轻烃气相色谱图可以看出, 后者的甲苯、二甲苯和邻二甲苯等相对较低分子量的芳香烃化合物含量明显要低一些, 而且 nC_7 /甲基环己烷比值要高 (图 7). 研究区这种轻烃组分明显差异与密度、含蜡量有关, 即主要表现为低蜡凝析油和高蜡轻质油的芳香烃化合物含量和 nC_7 /甲基环己烷比值不同, 表现出这些参数存在内在联系.

从原油的生物标志化合物角度来看, 本区原油气相色谱图表现出甾烷类化合物有不同类型的分布 (图 8), 残雪四井原油的 $C_{27}\sim C_{28}\sim C_{29}$ 甾烷呈反“L”型, 即 C_{29} 甾烷相对含量占明显的优势 ($C_{29}>C_{27}>C_{28}$), 表明该类原油主要以陆源高等植物为主的生源构成特征, 平湖五井深度为 $2\,703.2\text{ m}$ 的原油则有不同的分布特征, $C_{27}\sim C_{28}\sim C_{29}$ 甾烷呈不对称“V”型, 即 C_{27} 甾烷相对含量最高 ($C_{27}>C_{29}>C_{28}$), 表明该类原油有明显的低等水生生物为来源的贡献. 同时两类原油的伽玛蜡烷含量也有差异, C_{29} 甾烷相对含量多的原油的伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷含量比值小于 0.05 , 而 C_{27} 甾烷相对含量多的原油其比值 >0.05 , 这也显示两类原油有不同类型的母质来源. 根据所采集油样数统计, 以腐殖母质为主要生源的原油占总原油的 90% 左右, 以腐殖和腐泥母质共同生源的原油则占 10% .

3.2.2 原油成熟度 本文应用了多个地球化学参数综合判别了西湖凹陷原油的成熟度. 首先原油

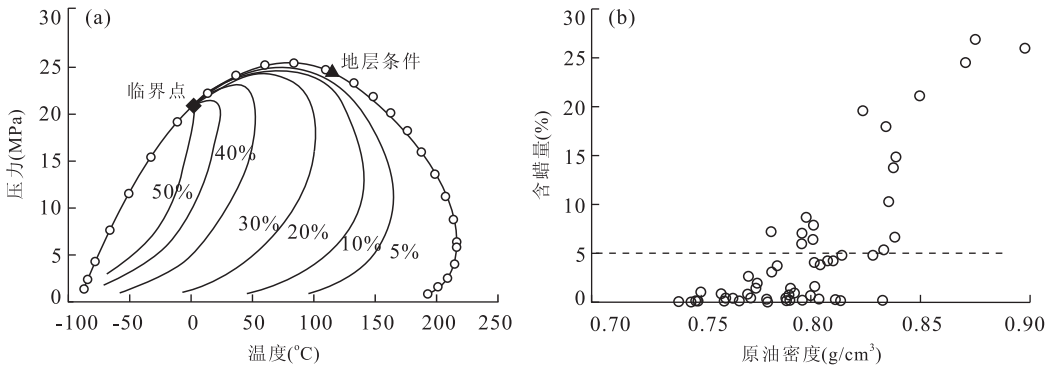


图 6 西湖凹陷 HY14-1-1 井 ($3\,031.15\sim3\,063.10\text{ m}$) 原油样品 PVT 相图 (a) 和原油密度与含蜡量的关系 (b)
Fig. 6 PVT phase diagram of crude oil samples in HY14-1-1 well (a) and diagram of density and wax content of crude oil (b), Xihu depression

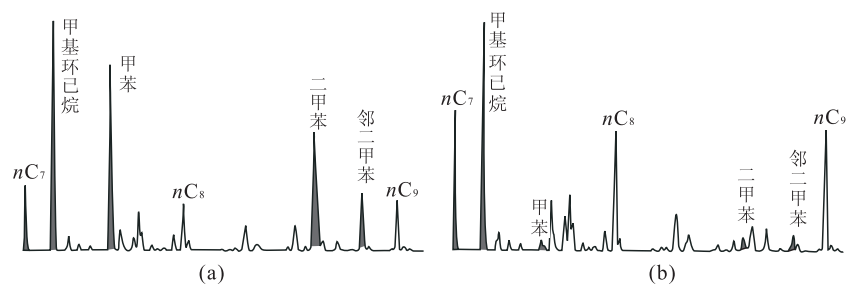


图 7 西湖凹陷不同原油的轻烃的气相色谱

Fig. 7 Gas chromatogram of light hydrocarbons of different crude oil in Xihu Depression

a. 平湖五井深度为 3 695. 5 m 的原油;b. 平湖四井深度为 2 708. 6 m 的原油

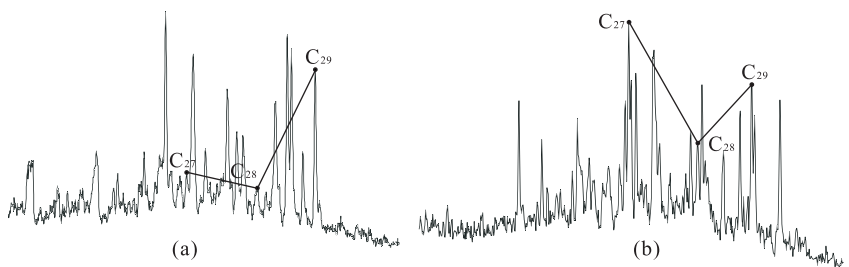


图 8 西湖凹陷不同原油甾烷化合物分布

Fig. 8 Distribution of steranes of different crude oil in Xihu Depression

a. 残雪四井原油;b. 平湖五井原油

表 1 西湖凹陷原油油样的成熟度参数

计算参数	轻烃参数		芳烃参数		生标成熟度参数		
	$T_{\text{emp}}(^{\circ}\text{C})$	$R_{\text{m}}(\%)$	MPI-1	$R_{\text{MPI-1}}(\%)$	$T_{\text{s}}/T_{\text{m}}$	$\text{C}_{29}\text{甾} 20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$	$\text{C}_{29}\text{甾} \beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$
范围	119~137	0. 82~1. 03	0. 38~1. 22	0. 6~1. 1	0. 77~1. 36	0. 39~0. 64	0. 41~0. 75

注: $T_{\text{emp}}=140+15[\ln(2,4\text{-DMP}/2,3\text{-DMP})]$ (Mango, 1990); $R_{\text{o}}=0. 012\ 3T_{\text{max}}-0. 676\ 4$ (Mukhopadhyay and Dow, 1994); $R_{\text{MPI-1}}=0. 6\text{MPI-1}+0. 37$.

OEP 介于 0. 99~1. 10 之间,基本无奇偶优势,表现成熟油的特征. 利用原油轻烃参数 2, 4-DMP/2, 3-DMP 比值通过 BeMent 公式计算得到该区原油生成温度 T_{emp} 介于 119~137 $^{\circ}\text{C}$, 折算成镜质组反射率 R_{m} 为 0. 82%~1. 03%, 表明原油均处于成熟阶段. 利用原油芳烃参数 MPI₁ 计算得到原油成熟度 $R_{\text{MPI-1}}$ 介于 0. 6%~1. 1% 的成熟阶段. 原油的生标成熟度化合物反映了原油“重组分”的成熟度, 研究区原油的 $T_{\text{s}}/T_{\text{m}}$ 、 $\text{C}_{29}\text{甾} 20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 $\text{C}_{29}\text{甾} \beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 分别介于 0. 77~1. 36、0. 39~0. 64 和 0. 41~0. 75 之间, 均反映了原油处于成熟阶段(表 1). 综合原油的 OEP 参数、生标成熟度参数、甲基菲指数和轻烃参数均反映了研究区原油处于成熟阶段.

综上,从西湖凹陷烃源岩和原油的地球化学特征可知,研究区烃源岩类型有 3 种,即煤、碳质泥岩和暗色泥岩,其中煤和碳质泥岩地化参数相似,而与

暗色泥岩有较大区别. 干酪根元素、氢指数、有机质显微组分和红外光谱测试均显示煤和碳质泥岩主要以陆源腐植母质为主,暗色泥岩则具有陆源和水生生物双重贡献. 然而这些源岩均含一定成分的壳质组,而且还主要以树脂体为主,这是早期生油物质;同时部分泥岩富含腐泥组,也能大量生油;而煤和碳质泥岩富含镜质组,尽管具有明显的生气倾向,但镜质组以富氢的基质镜质体为主,也具有一定的生油能力;而且研究区原油类型复杂,地化参数相差较大;因此西湖凹陷油岩复杂的地球化学特征显示了该区原油可能具有复杂的成因和来源.

4 油源和成因讨论

生物标志化合物保留着生物有机质的原始信息,且在后期演化过程中又保存着相对稳定的碳骨

架结构,因此是油油对比和油岩对比的首要“指纹”参数(侯启军等,2004). 姥鲛烷/植烷值(Pr/Ph)是判识有机质沉积环境的重要标志,可用于油源对比研究. 实验测试结果显示,大多数油样的 Pr/Ph 值较高,介于 $6.28\sim 8.98$,还存在少部分油样的 Pr/Ph 值介于 $1.86\sim 5.63$. 煤系源岩中煤及碳质泥岩的 Pr/Ph 值介于 $6.39\sim 12.49$,暗色泥岩的 Pr/Ph 值稍低,介于 $3.46\sim 5.39$. 从 Pr/Ph 可以初步推测,西湖凹陷原油来源煤系源岩,大多数原油来自煤及碳质泥岩,少部分原油来自暗色泥岩. 类异戊二烯烷烃中 Ph/nC_{18} 和 Pr/nC_{17} 包含了丰富的生源信息,Connan and Cassou(1980)基于 488 个油样归纳了不同类型干酪根生成的原油其 Ph/nC_{18} 和 Pr/nC_{17} 的分布特点,本文将西湖凹陷原油油样、暗色泥岩样、碳质泥岩和煤岩样品数据投入此图发现,碳质泥岩和煤表现出典型Ⅲ型干酪根的特征,同时与大部分油样具有明显的亲缘关系,而暗色泥岩干酪根类型主要介于Ⅲ型与Ⅱ型之间,且与少部分油样有亲缘关系(图 9a). 原油和源岩的 $C_{27}\sim C_{28}\sim C_{29}$ 甾烷相对含量比值也与大多数油样与碳质泥岩和煤岩一致,即 C_{29} 甾烷占优势,少数原油和部分泥岩一致,即 C_{27} 甾烷相对含量最高. 原油的稳定碳同位素与母质有直接关系,且受后期次生变化影响较小,因此是判别油源的一项重要指标,从油样、暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩的饱和烃与芳香烃的碳同位素关系图(剔除了混合和蒸发分馏影响大的油样)可以看出,暗色泥岩和少部分油样有联系,碳质泥岩、煤岩和绝大部分原油有关(图 9b),与 Ph/nC_{18} 、 Pr/nC_{17} 和 $C_{27}\sim C_{28}\sim C_{29}$ 甾烷参数判别结果一致. 根据上述得

到碳质泥岩、煤岩和暗色泥岩的热演化程度与原油的成熟阶段相符,排除外来的生油岩. 综上,大部分油来自碳质泥岩和煤岩,具有典型Ⅲ型腐殖油的特征,少部分油来自平湖组暗色泥岩,具有Ⅲ-Ⅱ型油的特征(总体上仍偏腐殖型). 因此根据油油、油岩对比结果和油样数量统计,目前西湖凹陷主力生油岩为平湖组碳质泥岩和煤层,暗色泥岩也有少量贡献.

关于西湖凹陷原油成因,众多学者说法不一. 而且前已述及,生油组分众多,如壳质组中的树脂体、部分富含腐泥组的泥岩和富氢基质镜质体的碳质泥岩、煤和部分暗色泥岩,因此原油成因复杂. 由于该区原油计算的成熟度为中等成熟度阶段,因此不是煤系源岩中树脂体早期生油导致,也不是传统干酪根生烃模式高成熟—过成熟度阶段的产物,而是由有机质的成熟阶段生成. 而且朱扬明等(2012)分析了西湖凹陷平湖组暗色泥岩、碳质泥岩和煤的热模拟产物,发现 3 种类型的源岩的液态烃生成模式只有一次生烃高峰期,且高峰阶段的镜质体反射率为 $0.8\%\sim 1.1\%$,说明该区没有煤系源岩早期生油的模式,且主要产油阶段在干酪根热演化程度的中等成熟阶段. 前文也证明了该区大部分原油具有腐殖特征,因此可以认为西湖凹陷原油主要是碳质泥岩和煤岩的镜质组中富氢基质镜质体为主要的生油组分,少部分原油是以部分暗色泥岩中腐泥和腐殖母质为生油组分,它们均在成熟阶段生成.

尽管前文确定了研究区的主力生油岩,而且根据原油的地球化学特征和上述油源对比,了解到研究区以腐殖型为母质的大多数原油和以腐殖型和腐泥型为母质的少数原油是在成熟阶段生成,但却无

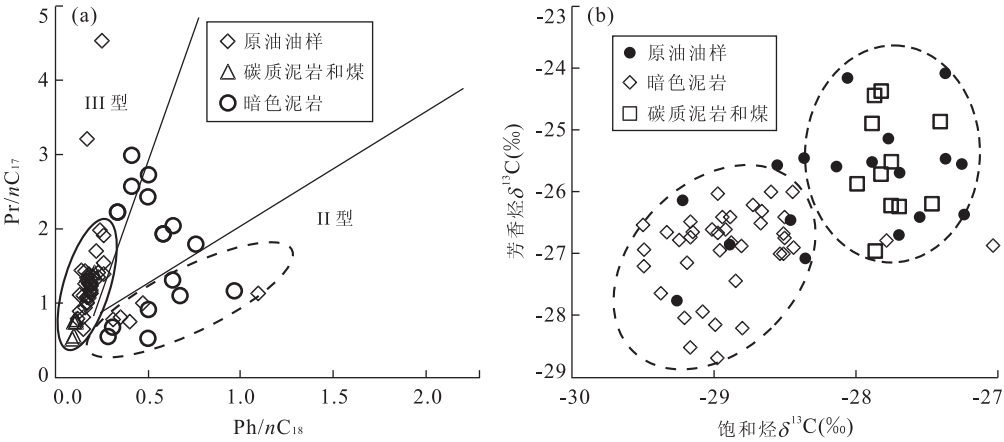


图 9 西湖凹陷原油、暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩的 Ph/nC_{18} 和 Pr/nC_{17} 的分布(a)和饱和烃与芳香烃的碳同位素关系(b)
Fig. 9 Distribution of Ph/nC_{18} and Pr/nC_{17} (a) and diagram of carbon isotope of saturated hydrocarbons and aromatic (b) of crude oil, dark mudstone, carbonaceous mudstone and coal rocks in Xihu depression

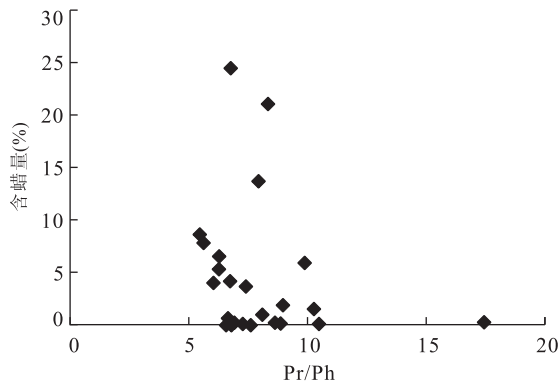


图 10 西湖凹陷原油 Pr/Ph 与含蜡量关系
Fig. 10 Diagram of Pr/Ph and wax content of crude oil in Xihu Depression

法解释该区凝析油“六低一高”和轻质油异常高蜡、高胶质和沥青质以及轻烃组成存在显著差异的特点,例如从能够表征原油生源参数 Pr/Ph 与含蜡量的关系图可知,两者几乎毫无相关性(图 10),这一特点不是原始生源母质类型导致,即凝析油藏的相态成因和轻质油具有异常高蜡的成因不是“原生型”,而可能是后天次生作用成因导致。

Thompson(1987)在储存着石油的密闭容器中逐渐注入过量的甲烷气,待达到气液平衡后,再除去气相,原油组分发生了物理分馏,即石油中轻组分溶解到气相中被带走,残余油相对富集芳烃、蜡质、胶质和沥青质,并提出蒸发分馏模式,同时利用芳香烃指数(甲苯/ nC_7)和饱和烃指数(nC_7 /甲基环己烷)来鉴别原油经历的次生变化(蒸发分馏、生物降解、水洗等)。实际上,蒸发分馏作用是一种很常见的地质作用,例如国内苏北盆地盐城凹陷、塔里木盆地乌

什凹陷等等地方均有发现(龚德瑜等,2014),当深部早期充满原油的圈闭进入大量外来天然气,天然气便会溶解原油轻馏分,当构造作用等因素导致圈闭温压条件发生变化,天然气便会沿着断裂或不整合面向上运移至合适的圈闭存储下来,形成次生凝析油气藏,下部圈闭中的残余油便会因失去轻馏分,而显示出相对高蜡、高密度的特点。从西湖凹陷原油油样的甲苯/ nC_7 和 nC_7 /甲基环己烷参数可知,研究区经历了大规模的蒸发分馏作用(图 11a)。一般未经历次生作用的原油,其正构烷烃碳数和摩尔分数的对数呈一条直线(Kissin, 1987),而实际上研究区部分原油却显示出低碳数正构烷烃组分损失的特征(图 11b),这也证明了该区蒸发分馏作用的存在。因此该区凝析油是干酪根在成熟演化阶段生成的原油遭受蒸发分馏作用形成,即“蒸发分馏”成因凝析油,同时该区密度高的轻质油具有高蜡特点。

按照一般的蒸发分馏模式,西湖凹陷垂向上原油分布应该是低蜡、低密度和“蒸发分馏”成因凝析油气藏分布在浅层,而高蜡、高密度残余油分布在深层,密度从上到下呈逐渐增加的趋势。事实上,西湖凹陷油藏密度并非完全按照此模式分布,以西湖凹陷平湖构造带为例,平湖油气田按照原油密度随深度逐渐增加的趋势,而构造北边的宝云亭、孔雀亭油气田却按照原油密度随深度逐渐减小的变化趋势。从西湖凹陷平湖 A 井和孔雀亭 A 井凝析油、高蜡油的成因模式图可知(图 12),平湖 A 井(PHA 井)油气藏的密度基本上随深度增大而增大($0.8014 > 0.7820 > 0.7607$ 和 0.7675 g/cm^3),含蜡量也是此规律($7.85\% > 1.55\% > 0.12\%$ 和 0.14%),即蒸发

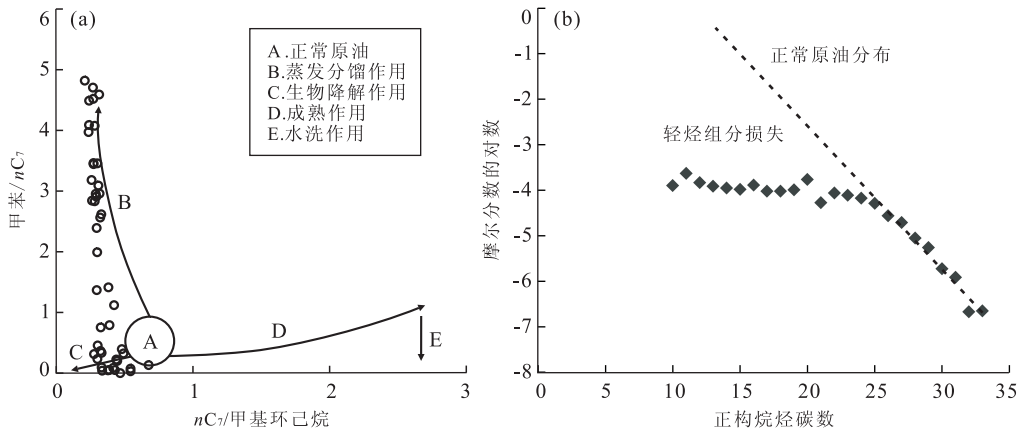


图 11 西湖凹陷原油次生变化识别(a)和正构烷烃碳数与摩尔分数分布(b)
Fig. 11 Dentification of secondary changes in crude oil (a) and distribution of n -alkane carbon number and the molar fraction (b) in Xihu depression

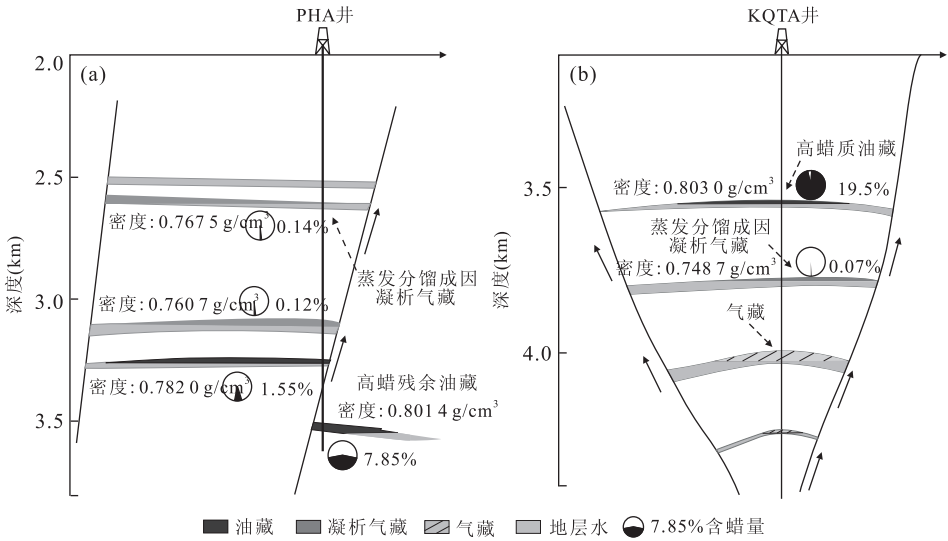


图 12 西湖凹陷凝析油和高蜡油的成因模式
Fig. 12 Genesis of condensate and high wax oil in Xihu Depression

分馏成因的凝析气向上运移至浅层直接保存下来了,下部残余油呈高蜡特质,这是典型蒸发分馏模式. 孔雀亭 A 井(KQTA 井)的油气藏的密度和含蜡量则呈相反的变化趋势,原因在于原先早期正常原油已运移至浅层圈闭,之后蒸发分馏成因形成的凝析气,随着断裂进入浅层油藏,由于温压场变化,导致烃气溶解能力下降,凝析油气发生解溶现象,导致中高分子量的饱和烃析出,溶解于油藏,从而原油含蜡量和密度都随之增加,这种过程可称为“混合作用”. 张水昌(2000)和杨楚鹏等(2009)在解释塔里木盆地轮南地区和塔中地区油气藏时也描述过类似现象. 因此,西湖凹陷原油成因除归结于大规模的“蒸发分馏作用”外,同时还有部分井区由“混合作用”导致,这些奠定了该区复杂的原油类型及分布格局.

5 结论

(1)西湖凹陷平湖组煤系源岩中碳质泥岩和煤岩主要以陆源生物为主要生源,其干酪根类型为Ⅲ型,而暗色泥岩则具有陆源生物和水生生物双重生源贡献,其干酪根类型Ⅲ-Ⅱ型,同时源石热解显示碳质泥岩和煤的生油潜力远高于泥岩. 源岩热解、红外光谱和生标参数均显示 3 种类型源岩处于热演化的成熟阶段.

(2)研究区原油主要为凝析油和轻质油,凝析油具有低密度、低蜡等“六低一高”的特点,轻质油具有高蜡特质,而且轻烃组成有明显差异. 原油的 $C_{27} \sim C_{28} \sim C_{29}$ 甾烷和伽玛蜡烷含量显示大部分原油为腐

殖型,少部分原油表现出具有腐殖和腐泥母质的特点. 原油的 OEP 参数、生标成熟度参数、甲基菲指数和轻烃参数均反映了该区原油处于中等成熟阶段.

(3)油油对比和油岩对比表明大部分油来自碳质泥岩和煤岩,具有典型Ⅲ型腐殖油的特征,少部分油来自平湖组暗色泥岩,具有Ⅲ-Ⅱ型油的特征(总体上仍偏腐殖型). 凝析油和轻质油的物性及轻烃组分的差异与源岩母质无关,是蒸发分馏的结果. 凝析油是干酪根在成熟演化阶段生成的原油遭受蒸发分馏作用的结果,高蜡油除了是“蒸发分馏作用”的残余油外,还有部分是“混合作用”的结果.

References

Connan, J., Cassou, A. M., 1980. Properties of Gases and Petroleum Liquids Derived from Terrestrial Kerogen at Various Maturation Levels. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(1): 1–23. doi: 10. 1016/0016–7037(80)90173–8

Chen, J. P., Huang, D. P., Li, J. C., et al., 1999. The Petroleum Generation Model for Organic Matter from Jurassic Coal Measure, Northwest China. *Geochimica*, 28(4): 327–339 (in Chinese with English abstract).

Fu, N., Li, Y. C., Chen, G. H., et al., 2003. Pooling Mechanisms of “Evaporating Fractionation” of Oil and Gas in the Xihu Depression, East China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 30(2): 39–42 (in Chinese with English abstract).

Ganz, H. H., Kalkreuth, W., 1991. IR Classification of Kerogen Type, Thermal Maturation, Hydrocarbon Potential

- and Lithological Characteristics. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 5 (1): 19—28. doi: 10. 1016/0743-9547(91)90007-K
- Gong, D. Y., Li, M., Li, Q. M., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Origins of the Oils in Wushi Sag, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25 (1): 62—69 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Q. J., Feng, Z. H., Huo, Q. L., 2004. Oil Migration Model and Entrapment Epoch of North Wuerxun Depression in Hailaer Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29 (4): 397—403 (in Chinese with English abstract).
- Jia, J. Y., Xu, X. H., Sun, B. Q., 2000. Oil/Gas Geochemical Characters in the Xihu Trough of the East China Sea. *Off-shore Oil*, 20 (2): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Kissin, Y., 1987. Catagenesis and Composition of Petroleum: Origin of N-Alkanes and Isoalkanes in Petroleum Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2445—2457. doi:10. 1016/0016-7037(87)90296-1
- Lei, C., Ye, J. R., Wu, J. F. et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39 (7): 837—847 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Q., Zhong, N. N., Xiong, B., et al., 1997. A Study on Coal Series Source Rock Organic Geochemical Evolution of Xihu Sag. *Coal Geology of China*, 9 (1): 33—36 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Wang, Y. P., Zhao, C. Y., et al., 2013. The FTIR Study on Structure Changes of Coal Kerogen in the Maturation Process. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32 (1): 97—101 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. F., Zhang, M., Zhong, N. N., 2007. Oil and Gas Geochemistry. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Lu, S. N., Zhang, G., 1994. A New Genesis Mode of Condensate. *Science in China (Series B)*, 24 (1): 81—86 (in Chinese).
- Ma, K. Y., Fan, P., 1995. Geochemical Evidence of Evaporation Fractionation Condensate of Sha18 Well in Northern Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 40 (19): 1785—1787 (in Chinese).
- Mango, F. D. 1990. The Origin of Light Hydrocarbons in Petroleum: A Kinetic Test of the Steady-State Catalytic Hypothesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (5): 1315—1323. doi:10. 1016/0016-7037(90)90156-F
- Mukhopadhyay, P. K., Dow, W. G., 1994. Vitrinite Reflectance as a Maturity Parameter: Applications and limitations. American Chemical Society, Washington D. C. .
- Snowdon, L. R., Powell, T. G., 1982. Immature Oil and Condensate: Modification of Hydrocarbon Generation Model for Terrestrial Organic Matter. *AAPG Bulletin*, 66 (6): 775—788.
- Su, A., Chen, H. H., Wang, C. W., et al., 2013. Genesis and Maturity Identification of Oil and Gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (5): 521—527 (in Chinese with English abstract).
- Su, A., Chen, H. H., Wang, C. W., et al., 2014. Source of Natural Gas in Xihu Depression of the East China Sea Basin. *Geological Science and Technology Information*, 33 (1): 157—162 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, K., 1987. Gas Condensate Migration and Oil Fractionation in Deltaic Systems. *Marine and Petroleum Geology*, 5 (3): 237—246. doi: 10. 1016/0264-8172(88)90004-9
- Tissot, B. P., Welte, D. H., 1978. Petroleum Formation and Occurrence. Springer, Berlin.
- Yang, C. P., Geng, A. S., Liao, Z. W., et al., 2009. Quantitative Gas Washing Evaluation on Reservoirs in Tazhong Area of Tarim Basin. *Science in China (Series D)*, 39 (1): 51—60 (in Chinese).
- Zhang, G. C., Miao, S. D., Chen, Y., et al., 2013. Distribution of Gas Enrichment Regions Controlled by Source Rocks and Geothermal Heat in China Offshore Basins. *Natural Gas Industry*, 33 (4): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., 2000. The Migration Fractionation: An Important Mechanism in the Formation of Condensate and Waxy Oil. *Chinese Science Bulletin*, 45 (6): 667—670 (in Chinese).
- Zhang, Z. H., Huang, Z. L., Zhang, Z. Y., et al., 2004. Geochemical Characteristics and Origin of High-Wax Condensate and High-Gravity Oil in the Western Turpan-Hami Basin. *Acta Geologica Sinica*, 78 (4): 551—559 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. M., Zhou, J., Gu, S. X., et al., 2012. Molecular Geochemistry of Eocene Pinghu Formation Coal-Bearing Source Rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (1): 32—39 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建平, 黄第藩, 李晋超, 等, 1999. 西北地区侏罗纪煤系有机成烃模式. 地球化学, 28 (4): 327—339.

傅宁,李友川,陈桂华,等,2003. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制. 石油勘探与开发,2: 39—42.

龚德瑜,李明,李启明,等,2014. 塔里木盆地乌什凹陷原油地球化学特征及油源分析. 天然气地球科学,25(1): 62—69.

侯启军,冯子辉,霍秋立,2004. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷石油运移模式与成藏期. 地球科学——中国地质大学学报,29(4): 397—403.

贾健谊,须雪豪,孙伯强,2000. 东海西湖凹陷原油与天然气的地球化学特征. 海洋石油,20(2): 1—7.

雷闯,叶加仁,吴景富,等,2014. 低勘探程度盆地成藏动力学过程:以西湖凹陷中部地区为例. 地球科学——中国地质大学学报,39(7): 837—847.

李贤庆,钟宁宁,熊波,等,1997. 西湖凹陷煤系源岩的有机质热演化研究. 中国煤田地质,9(1): 33—36.

李岩,王云鹏,赵长毅,等,2013. 煤中干酪根在热演化中结构变化的红外光谱研究. 矿物岩石地球化学通报,32(1): 97—101.

卢双舫,张敏,钟宁宁,2007. 油气地球化学. 北京:石油工业出版社.

卢松年,张刚,1994. 一种新的凝析油形成模式. 中国科学(B辑),24(1): 81—86.

马柯阳,范璞,1995. 塔北沙 18 井石炭系蒸发分馏成因凝析油确认的地球化学证据. 科学通报,40(19): 1785—1787.

苏奥,陈红汉,王存武,等,2013. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别. 石油勘探与开发,40(5): 521—527.

苏奥,陈红汉,王存武,等,2014. 东海盆地西湖凹陷天然气来源探讨. 地质科技情报,33(1): 157—162.

杨楚鹏,耿安松,廖泽文,等,2009. 塔里木盆地塔中地区油藏气侵定量评价. 中国科学(D辑),39(1): 51—60.

张功成,苗顺德,陈莹,等,2013. “源热共控”中国近海天然气富集区分布. 天然气工业,33(4): 1—17.

张水昌,2000. 运移分馏作用:凝析油和蜡质油形成的一种重要机制. 科学通报,45(6): 667—670.

张枝焕,黄志龙,张振英,等,2004. 吐哈盆地西部地区高蜡凝析油和轻质油的地球化学特征及成因分析. 地质学报,78(4): 551—559.

朱扬明,周洁,顾圣啸,等,2012. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征. 石油学报,33(1): 32—39.

《地球科学——中国地质大学学报》
2015 年 7 月 第 40 卷 第 7 期 要目预告

珠 I 坳陷油源对比及恩平组烃源岩的相对贡献	国朋飞等
基于相空间重构和小波分析一粒子群向量机的滑坡地下水位预测	黄发明等
华南李家沱剖面寒武纪纽芬兰世海水氧化还原性质演化及其驱动因素	向雷等
新疆准噶尔红山岩体地质地球化学特征及对下地壳性质的启示	姜芸等
黔东南地区新元古代下江群的地层年代及其地质意义	覃永军等
扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学研究及其构造意义	邱啸飞等
黑龙江省漠河县砂宝斯金矿床流体特征及矿床成因	李良等