

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019070404

西湖凹陷平北地区平湖组煤系烃源岩生烃潜力研究

杨鹏程¹, 刘峰¹, 沈珊¹, 董靛雯¹, 白玉洪²

1. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120

2. 中石化海洋石油工程有限公司上海特殊作业分公司, 上海 200137

摘要: 西湖凹陷平北地区平湖组发育海陆过渡相的煤系烃源岩, 以生烃潜力为主要依据对煤岩以及暗色泥岩的有机质丰度进行了评价, 并建立了相应的评价标准, 评价结果显示其有机质丰度均为中等—好, 煤岩表现为 $S_1+S_2 > 90$ mg/g, $HI > 100$ mg/g, 氯仿沥青“*A*” $> 1.0\%$; 暗色泥岩表现为 $TOC > 1\%$, $S_1+S_2 > 2$ mg/g, 氯仿沥青“*A*” $> 0.05\%$, 总烃“*HC*” $> 150 \times 10^{-6}$ 。干酪根元素分析显示煤的干酪根类型主要为 II₁-II₂ 型, 富氢的显微组分含量较高, 壳质组中的树脂体、孢子体及角质体含量达到 10%~20%, 且含有约 20% 的富氢镜质体, 表明煤具有较高的生油潜力; 暗色泥岩的富氢显微组分低于煤岩, 有机质类型主要为 II₂-III 型, 以生气为主。根据镜质体反射率 R_o 以及 S_1+S_2/TOC 等指标共同确定了平北地区烃源岩的生烃门限 (3 100 m) 和排烃门限 (3 500 m)。热模拟实验显示平湖组煤具有油气共生的特点, 具有较高的产油率, 可达 130 mg/g TOC, 产气率可达 125 mg/g TOC; 暗色泥岩以生气为主, 产油率最高仅为 50 mg/g TOC, 产气率可达 185 mg/g TOC, 且生气周期长。基于平北地区较重的原油碳同位素和生物标志物特征对比, 认为煤成油在研究区广泛存在。

关键词: 煤系烃源岩; 生烃潜力; 煤成油; 西湖凹陷

中图分类号: P744.4, TE122.1 文献标识码: A

A study on the hydrocarbon generation potential of the coal-bearing source rocks in the Pinghu Formation of Pingbei area, the Xihu depression

YANG Pengcheng¹, LIU Feng¹, SHEN Shan¹, DONG Jingwen¹, BAI Yuhong²

1. Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China

2. Shanghai Special Operations Branch, SINOPEC Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Shanghai 200137, China

Abstract: The source rocks of the Pinghu Formation in the Pingbei area of the Xihu depression consist of a set of coal-bearing deposits of marine-continental transitional facies. Organic matter abundance of the coal and dark mudstone were evaluated mainly based on potential hydrocarbon generation amount according to the evaluation criteria established. Results show that both the coal rocks and dark mudstones have high hydrocarbon generation potential and medium to high abundance of organic matter. The coal rocks are featured by $S_1+S_2 > 90$ mg/g, $HI > 100$ mg/g, “*A*” $> 1.0\%$, while the mudstones characterized by $TOC > 1\%$, $S_1+S_2 > 2$ mg/g, “*A*” $> 0.05\%$, “*HC*” $> 150 \times 10^{-6}$. It is identified that Kerogen of the coal rocks belongs to type II₁-II₂ according to the elemental data, and the content of hydrogen-rich macerals is very high. The total content of resinite, sporophyte and cuticle in exinite is up to 10%~20%, and the content of hydrogen-rich vitrinite is as high as 20%, indicating a high oil-generating potential. The content of hydrogen-rich macerals in mudstone is lower than that in coal rocks. The kerogen belongs to type II₂ with higher gas-generating potential. Threshold depth of oil generation and expulsion in the Pingbei area were determined by R_o values and $(S_1+S_2)/TOC$ values, and they are 3 100 m and 3 500 m respectively. The results of thermal simulation show that the coal rocks are prone to generating both oil and gas, with higher proportion of oil. Oil generation rate can reach 130 mg/g TOC and Gas generation rate about 125 mg/g TOC. The mudstone is gas-prone for a long history of gas generation. Data suggests that the oil generation rate is 50 mg/g TOC only, while the gas generation rate can reach 185 mg/g TOC. Coal-derived oil is widely existed in the Xihu depression according to the heavier crude oil carbon isotope and correlation of biomarkers between oils and source rocks.

Key words: coal-bearing source rocks; hydrocarbon potential; coal-generated oil; Xihu depression

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目“西湖凹陷斜坡带油气成藏条件及目标评价”(KJ-2019-11)

作者简介: 杨鹏程(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质综合研究, E-mail: yangpch.shhy@sinopec.com

收稿日期: 2019-07-04; 改回日期: 2020-01-14. 蔡秋蓉编辑

煤成烃理论始于20世纪40年代,德国学者创立了煤成气理论,认为煤在演化过程中能生气并能发生运移而聚集成藏^[1]。但从20世纪60年代以来,国外先后在澳大利亚吉普斯兰盆地、加拿大的斯科舍盆地等地区发现了与煤系地层相关的油田^[2]。20世纪70年代,戴金星发现煤系成烃以气为主以油为辅的总规律,并总结了成煤作用全过程,形成了系统的煤成烃理论^[3],认为煤系烃源岩为“全天候”的烃源岩,具备较强的生烃潜力。自1989年以来我国先后在吐哈盆地、准噶尔盆地等侏罗系煤系地层中发现了大型煤成油气田群,掀起了中国陆相盆地煤成油研究的高潮^[4-6]。在此期间,黄第藩^[4-6]等在煤的显微组成与有机岩石学特征、煤成油的生排烃特征、运移机制等方面取得了比较系统的研究成果,丰富了煤成烃理论。

西湖凹陷保俶斜坡带平湖组煤系烃源岩的研究始于20世纪90年代,前人对煤系烃源岩的生烃潜力、岩石学特征以及油气来源进行过系统研究^[7-9],但也存在一些问题,比如煤岩及暗色泥岩的有机质丰度评价标准混乱、煤与暗色泥岩生烃能力以及生烃模式尚存在分歧等。本文从分析化验资料入手,通过生烃模拟对平湖组煤系烃源岩中的煤以及暗色泥岩的生烃潜力进行了评价,建立了不同岩性烃源岩的生烃模式,并进一步分析了西湖凹陷煤成油的资源前景。

1 区域地质概况

西湖凹陷是东海陆架盆地的次级构造单元,也是盆地内勘探程度最高的凹陷。西湖凹陷西部以海礁凸起为界,东部以钓鱼岛褶皱带为界,凹陷内部根据构造特征自西向东划分为保俶斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹、东部断阶带共5个次级构造带(图1)。西湖凹陷新生代的构造演化主要经历了古新世—始新世的断陷期、渐新世—中新世的拗陷期、上新世以后的区域沉降3个阶段,具有先断后拗的演化特征,断陷期沉积的始新统宝石组、平湖组是西湖凹陷主要的烃源层系。

平湖组发育于凹陷由断陷阶段向拗陷阶段的转换时期,沉积环境主要为半封闭海湾沉积环境,其中平下段主要发育潮坪沉积环境,平中上段主要发育受潮汐影响的三角洲。在此环境下,水体介质性质为咸水—半咸水、氧化—弱还原,各沉积环境中的泥碳沼泽是煤系烃源岩发育的最有利地带。魏恒飞^[10]研究认为古气候、海平面变化和构造格局

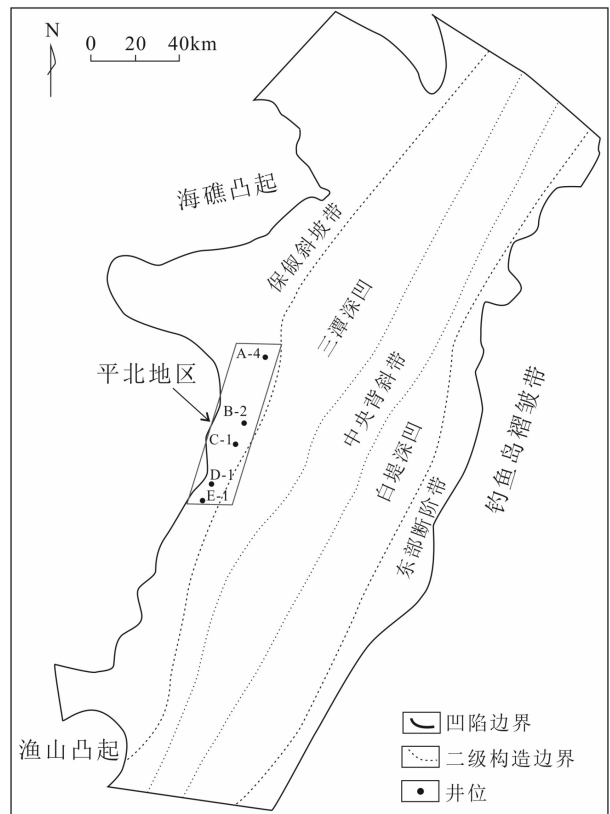


图1 平北地区构造位置图^[11]
Fig.1 Geotectonic map of Pingbei area^[11]

共同控制了西湖凹陷平湖组煤系烃源岩的发育。

平北地区是西湖凹陷勘探开发程度最高的地区之一,相继发现了宝云亭、武云亭、孔雀亭油气田,油气发现主要集中在平湖组。钻井证实平北地区平湖组煤层发育程度较高,虽然单层厚度较小(1~2 m),但累计厚度较大,可达20~60 m。同时,平湖组暗色泥岩也十分发育,且累计厚度较大,可达300~700 m。因此,平湖组煤系烃源岩具有较好的生烃物质基础。

2 煤系烃源岩特征

陈建平^[11]按照有机碳含量对煤系烃源岩的岩性进行了划分,认为煤岩的有机碳含量大于40%,煤系泥岩的有机碳含量小于6%,碳质泥岩的有机碳含量为6%~40%。对于西湖凹陷平湖组煤系烃源岩来讲,按照此标准也可以划分为暗色泥岩、碳质泥岩和煤3种岩性,而碳质泥岩从有机质丰度到有机质类型均是暗色泥岩与煤岩的过渡,本文主要对暗色泥岩和煤岩这两种差异较大的烃源岩类型进行研究。

2.1 有机质丰度

我国很早就建立了湖相烃源岩的评价标准, 主要评价参数为有机碳、氯仿沥青“*A*”、总烃和热解生烃潜量^[12], 但陈建平^[11]认为煤系烃源岩由于其特殊的沉积环境和母质组成使其有效碳含量偏低, 生烃评价要以生烃潜量为依据。由于煤的有机碳的含量随着变质程度的增大而增大^[13], 且其生烃潜量主要与富氢组分相关, 选择热解生烃潜量 (S_1+S_2)、氢指数 (HI)、氯仿沥青“*A*”作为煤岩的评级指标。而暗色泥岩的生烃潜量、氯仿沥青“*A*”等指标与有机碳的关系良好, 选择有机碳、氯仿沥青“*A*”、总烃和热解生烃潜量作为评价指标。

利用陈建平^[11]、秦建中^[14]提出的煤系烃源岩的评价标准对西湖凹陷煤岩有机质丰度进行评价时, 发现生烃潜量与氢指数、氯仿沥青“*A*”的关系均不好。考虑到不同地区煤系烃源岩的生成环境及有机质类型存在差别, 本次评价以生烃潜量为依据, 结合平北地区各项参数的相关性, 共同确定了研究区煤岩的有机质丰度评价标准 (表 1)。从图 2a 以及图 2b 可以看出, 西湖凹陷平湖组烃源岩煤岩的有机质丰度较高, HI 指数大于 150 mg/g, 多数约为 300 mg/g, S_1+S_2 为 100~250 mg/g, 氯仿沥青“*A*”多数大于 1%, 几项指标均达到中等—好的评价标准,

具有较高的生烃潜力。

暗色泥岩的烃源岩评价同样利用陈建平^[11]、秦建中^[14]提出的成煤环境下暗色泥岩烃源岩的评价标准, 并根据研究区生烃潜量与各项参数实际的相关性, 综合确定了研究区煤系环境下暗色泥岩的有机质丰度评价标准 (表 2)。从图 2c 和图 2d 可以看出, 西湖凹陷平湖组暗色泥岩的有机质丰度同样较高, TOC 多在 1% 以上, S_1+S_2 大于 2 mg/g, 氯仿沥青“*A*”多数大于 0.15%, 总烃 (HC) 大于 400×10^{-6} , 同样达到中等—好的评价标准。

2.2 有机质类型

有机质类型同样是衡量烃源岩生烃潜力的重要指标, 有机岩石学方法以及有机地球化学法是干酪根母质类型常用的两种方法。干酪根有机元素

表 1 研究区煤岩有机质丰度评价标准

Table 1 Evaluation criteria of organic matter abundance of coal rocks in study area

评价标准	S_1+S_2 / (mg/g)	HI / (mg/g)	A/%
好	>150	>300	>2.0
中	90~150	150~300	1.0~2.0
差	60~90	100~150	0.5~1.0
非	<60	<100	<0.5

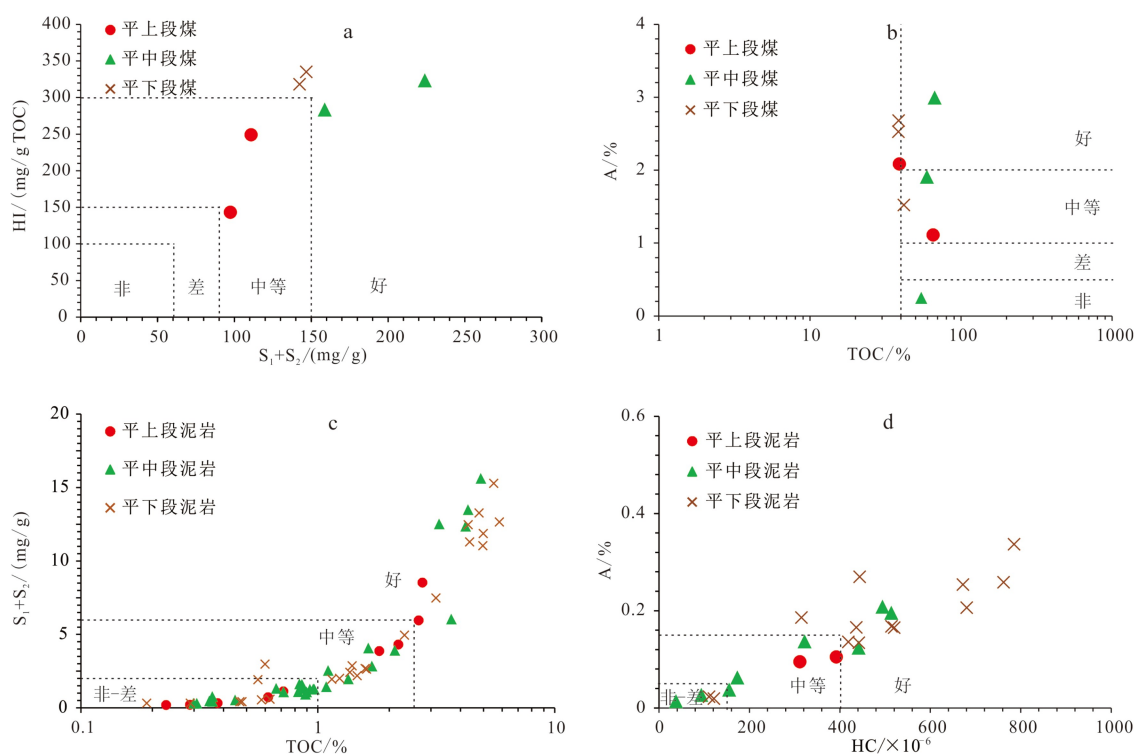


图 2 平湖组烃源岩有机质丰度评价

Fig.2 Assessment on organic matter abundance of Pinghu Formation

的 H/C 和 O/C 是反映干酪根类型的较好指标,二者组成的范氏图既可以反映有机质类型又可以反映热演化程度。另外,显微镜鉴别有机显微组分是确定烃源岩有机质类型较为直观的方法。

西湖凹陷平北地区平湖组煤岩的干酪根有机元素表现出较高的 H/C 以及较低的 O/C,属于 II₁-II₂ 的干酪根类型(图 3a)。其有机显微组成以镜质组为主,达到 80% 以上,其次为壳质组,含量为 10%~20%。镜质组是由植物的木质纤维组织受凝胶化作用转化形成,主要包括均质镜质体和基质镜质体,镜质组通常以生气为主,但基质镜质体常含富氢镜质体,同样有较高的生油潜力^[15-16],平湖组煤岩的富氢镜质体可以达到 20%。煤岩壳质组的组分主要包括树脂体、孢子体以及角质体(图 3b),模拟实验^[8]证实这些富氢的显微组分生油潜力较高,可以达到 250~350 mg/g,是大量生油的基础,其中树脂体是强生油的壳质组组分^[17],而平湖组树脂体的平均含量达到 4.9%,这是平湖组煤成油的重要物质基础。从图 4 可以看到几种显微组分都有明显的油浸荧光,也提供了壳质组生油的直接证据。

平湖组暗色泥岩的干酪根有机元素同样表现出较高的 H/C 以及较低的 O/C,但 H/C 明显低于煤,干酪根类型主要为 II₂-III 型(图 3a)。有机显微组成

(图 3b)以壳质组为主,达到 60%,其次为镜质组。壳质组的组成以腐殖无定形体为主,腐殖无定形体是高等植物的表皮组织等经微生物强烈降解形成的一种显微组分,整体以生气为主,由于常混有壳质碎屑,也有一定的生油潜力,但生油潜力要弱于树脂体。因此,对于暗色泥岩来讲,整体以生气为主,也有一定的生油潜力。

2.3 有机质成熟度

表征有机质演化的指标有很多,比如镜质体反射率(Ro)、岩石最高热解峰温(Tmax)、烃源岩抽提物的正构烷烃分布及碳优势指数 CPI 以及甾烷异构化比值等。

生烃门限的确定主要是根据 Ro、甾烷异构化指数以及 CPI 指数,图 5 显示 Ro 在 0.55% 时对应的深度为 3 100 m;甾烷异构化指数开始大于 0.2,表明有机质演化由未熟进入低熟阶段;正构烷烃碳优势指数 CPI,开始小于 2。因此,综合确定西湖凹陷平北地区煤系烃源岩的生烃门限为 3 100 m。

排烃门限的确定主要是根据(S₁+S₂)/TOC,生烃潜力指数通常随深度增大表现为先增大后降低,而开始降低的点就对应着排烃门限^[18]。图 5 显示西湖凹陷平北地区平湖组烃源岩(S₁+S₂)/TOC 随深度

表 2 研究区泥岩有机质丰度评价标准
Table 2 Evaluation criteria of organic matter abundance of mudstone in study area.

评价标准	TOC/%	S ₁ +S ₂ / (mg/g)	A/%	HC/10 ⁶
好	>2.5	>6.0	>0.15	>400
中	1.0~2.5	2.0~6.0	0.05~0.15	150~400
差	0.6~1.0	0.6~2.0	0.02~0.05	50~150
非	<0.6	<0.6	<0.02	<50

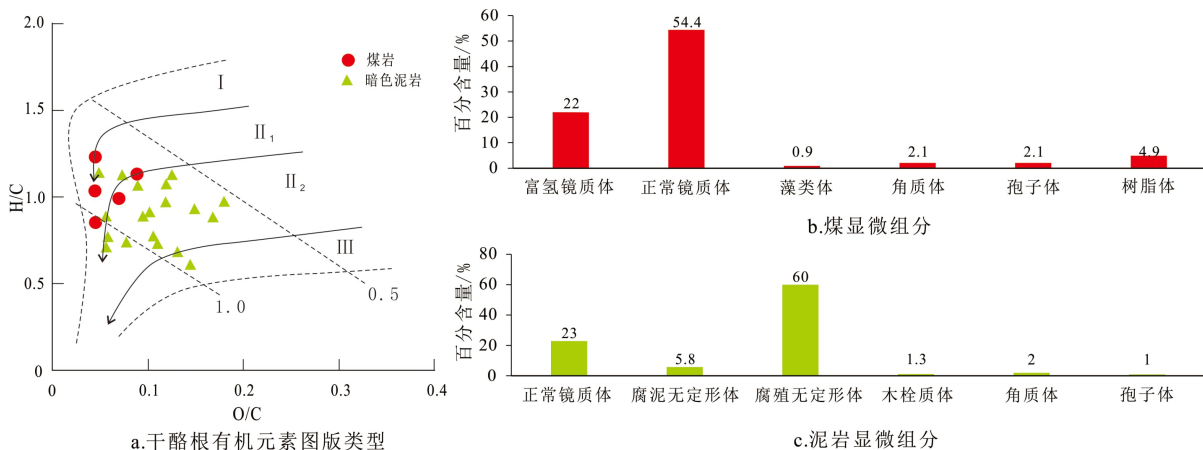


图 3 平湖组烃源岩有机质类型评价
Fig.3 Assessment on organic matter types of Pinghu Formation

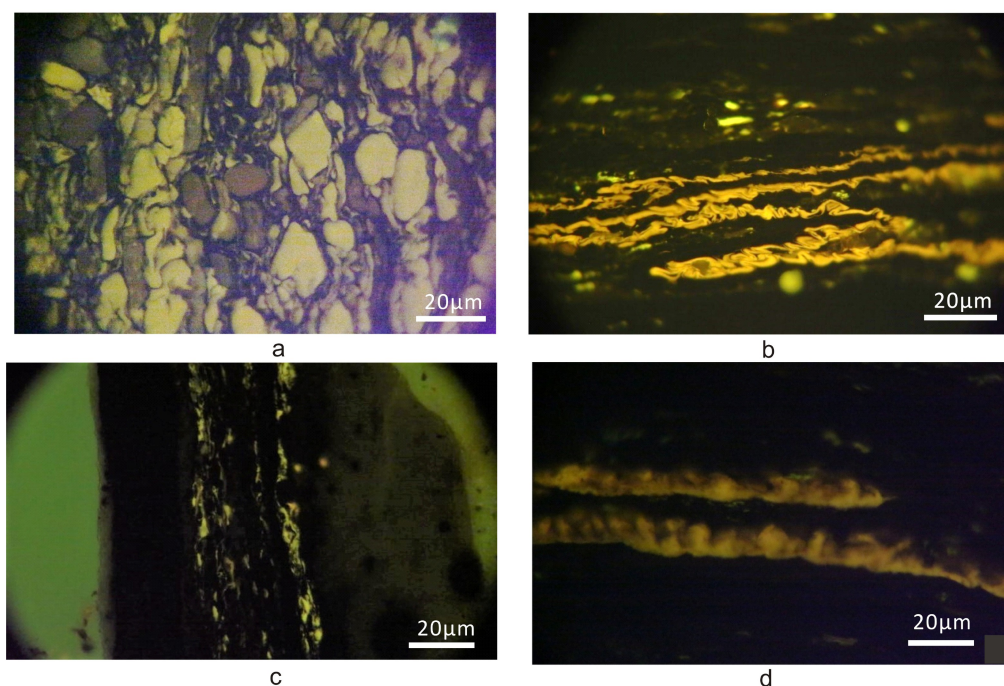


图 4 平湖组某井煤岩壳质组有机显微组分

a.树脂体, 油浸荧光, 500×; b.孢子体, 油浸荧光, 500×; c.层状藻类体, 油浸荧光, 500×; d.角质体, 油浸荧光, 500×。

Fig.4 Organic micro-compositions of exinite of coal rocks in Pinghu Formation

a.resinite, immersion fluorescence, 500×; b. sporophyte, immersion fluorescence, 500×; c. lamellar algae, immersion fluorescence, 500×; d. cutinite, immersion fluorescence, 500×.

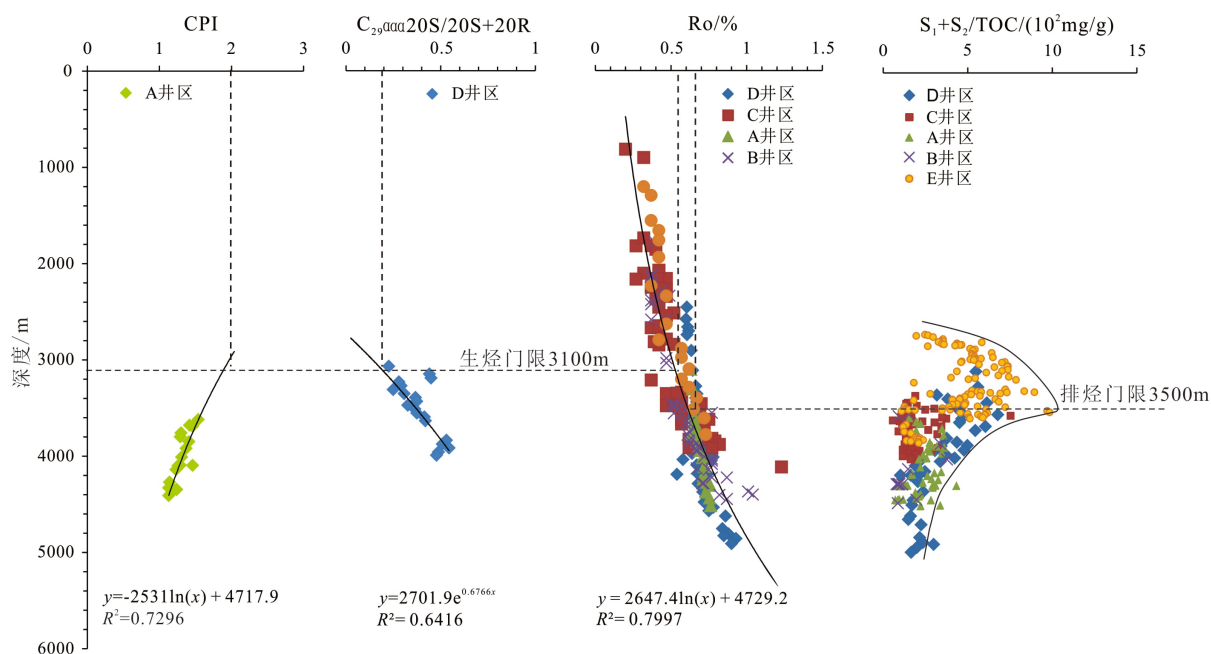


图 5 平北地区平湖组烃源岩热演化剖面

Fig.5 Thermal evolution profile of source rock of Pinghu Formation in Pingbei area

增加呈现先增大后变小的趋势, 排烃门限对应的深度为 3 500 m。

由于平北地区地温梯度仅为 2.6~3.0 °C/100 m,

远低于中央背斜带平均 3.4 °C/100 m 的地温梯度, 所以生、排烃门限深度相对较大。整体来看, 西湖凹陷平北地区已钻井平湖组烃源岩多数已进入排

烃门限,本地烃源以及东侧的三潭深凹的烃源均可以向平北地区大量供烃。

3 煤系烃源岩生烃潜力与演化

热模拟实验是研究烃源岩生烃潜力以及演化的有效手段,本次实验利用金管作为限定体系,置于高压釜中进行热模拟,最终得到气态烃以及液态烃产率。样品分别选取了平北地区平湖组 A-X 井的煤岩样品以及 B-X 井的泥岩样品(表 3),二者的热演化程度相对较低,适合进行热模拟试验,煤岩和泥岩样品选取了 TOC、HI 以及 S_1+S_2 比较能反映其特征的样品。实验过程中首先进行样品的制备,将样品研磨至 100 目,取 200 mg 样品并加入适量蒸馏水,利用氩弧焊机封入黄金管中;然后将样品放入反应釜,利用压力跟踪泵注入蒸馏水使得压力为 1 Ma,保持以 20 °C/h 的升温速率升到目标温度,目标温度选择 320 °C 开始,每隔 20 °C 设置一个温度点,至 600 °C/h 共 15 个温度点,升至目标温度保持恒温 24 h,升温过程同时升压,达到目标温度时保

持恒压 60 Ma;反应完毕后利用气体定量装置求出气体体积,再根据组分求出气体单个组分的质量,液态烃首先在溶剂状态下保持轻烃没有损失,待挥发后用称重法进行液态烃定量。

模拟实验得到的气态烃、液态烃产率是指样品的单位原始有机碳在各模拟温度点生成的气态烃和液态烃的质量分数,能够直观的反映有机质产烃潜力,为了方便划分演化阶段,将温度点换算成了对应的 R_o 。从模拟结果(图 6)来看,煤岩和暗色泥岩的液态烃及气态烃的产烃率趋势符合烃源岩真实的热演化规律,产油率和产气率也与有机质丰度、有机质类型高度相关,模拟结果较为可靠。

3.1 煤岩生烃潜力与演化

煤岩的热模拟试验结果如图 6a,煤岩具有油气共生的特点。从产油率趋势来看,煤岩整体为先增大后减小;从产油率数值来看,最高的产油率可达 130 mg/g TOC,这充分体现了煤岩样品较高的氢指数以及生烃潜力。最高产油率对应的 R_o 约为 1.0%,对应煤岩的生油高峰;在 R_o 达到约 1.2%,产油率开

表 3 平湖组煤及泥岩热模拟试验样品地化参数

Table 3 Geochemical index of the thermal simulation experiment of coal rock and mudstone in Pinghu Formation

井号	岩性	R_o /%	TOC/%	HI/(mg/g)	S_1 /(mg/g)	S_2 /(mg/g)
A-X井	煤	0.4	61	320	2.34	127.44
B-X井	泥岩	0.6	2.5	236	0.54	5.86

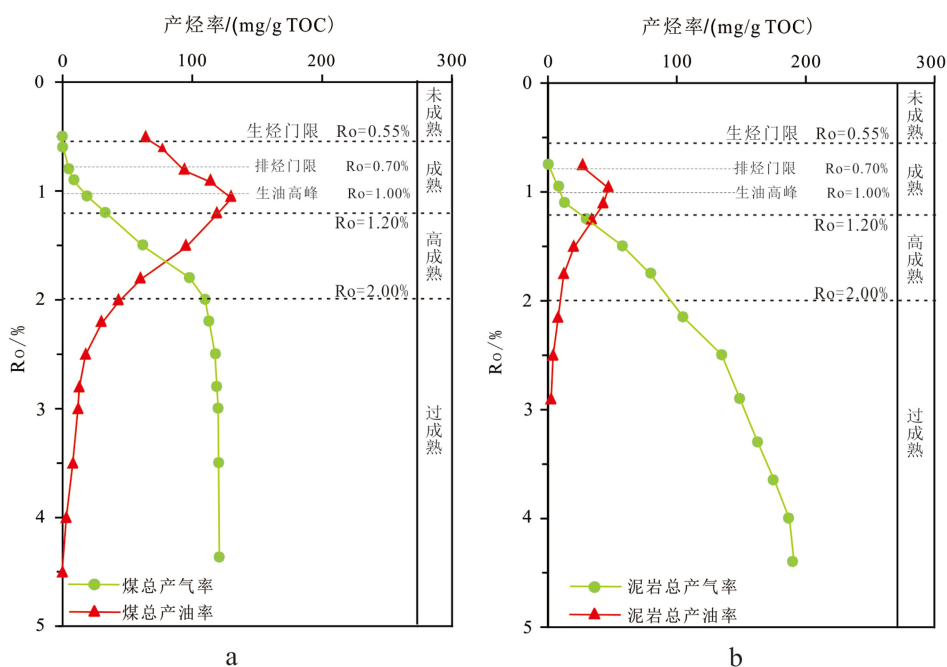


图 6 平湖组烃源岩热模拟试验产率与热演化剖面

Fig.6 Product yields and thermal evolution profile of the thermal simulation experiment in Pinghu Formation

始急剧减小,进入大量裂解阶段;至 $Ro=2.0\%$,液态烃的产率已经很低了。从产气率趋势来看,气态烃整体呈现逐渐增大的趋势,直到 Ro 达到 4% 都有增长,所以煤岩具有产气周期长的特点,至 $Ro=2.0\%$ 气态烃增加的趋势变缓,产气率最大可达 125 mg/g TOC 。结合生烃门限以及排烃门限的研究,将煤岩的热演化阶段分为未熟阶段($Ro\leq 0.55\%$)、成熟阶段($0.55\%<Ro\leq 1.2\%$)、高成熟阶段($1.2\%<Ro\leq 2.0\%$)以及过成熟阶段($Ro>2.0\%$)。

3.2 泥岩生烃潜力与演化

泥岩的热模拟试验结果如图6b,整体以生气为主。从产油率趋势来看,同样为先增大后减小,但产油率数值明显要低于煤岩,最高的产油率约 50 mg/g TOC 。最高产油率对应的 Ro 约为 1.0% ,对应暗色泥岩的生烃高峰。从产气率趋势来看,整体是逐渐增大的趋势,直到 $Ro=4.5\%$,因此,暗色泥岩生气周期同样较长。在 $Ro=1.2\%$ 时,产油率急剧减小,产气率急剧增大,是成熟阶段与高成熟阶段的分界。产气率最高达到 185 mg/g Toc ,高于煤岩样品的气态烃产率。结合生烃门限以及排烃门限的研究,同样将暗色泥岩的热演化阶段分为未熟阶段($Ro\leq 0.55\%$)、成熟阶段($0.55\%<Ro\leq 1.2\%$)、高成熟阶段($1.2\%<Ro\leq 2.0\%$)以及过成熟阶段($Ro>2.0\%$)。

4 煤成油的主要证据

从煤岩的有机质丰度评价以及生烃模拟实验来看,西湖凹陷平北地区煤岩具有较高的生烃潜力,尤其是生油能力较强。但目前对于煤成油的争论^[19-20]一直较大,主要集中在煤中生成的石油能否顺利排出并聚集成藏。本文从西湖凹陷平北地区平湖组已发现原油的碳同位素特征和生物标志物特征分析认为煤岩与已发现原油有较好的亲缘关系,贡献较大,煤成油在西湖凹陷是广泛存在的。

从煤岩和泥岩抽提物的碳同位素特征(图7)来看,煤岩碳同位素偏重,B-1井煤岩样品干酪根、沥青质、非烃、芳烃以及饱和烃碳同位素普遍重于B-1井暗色泥岩样品。而平北地区已发现的原油同位素较重,与煤岩的碳同位素相当,推测平北地区的原油有较大的煤岩的贡献。

从B-4井原油饱和烃质谱图(图8)来看,二萜类化合物($m/z=123$)非常丰富,原油检测到了含量丰富的海松烷类三环二萜类化合物以及扁枝烷等

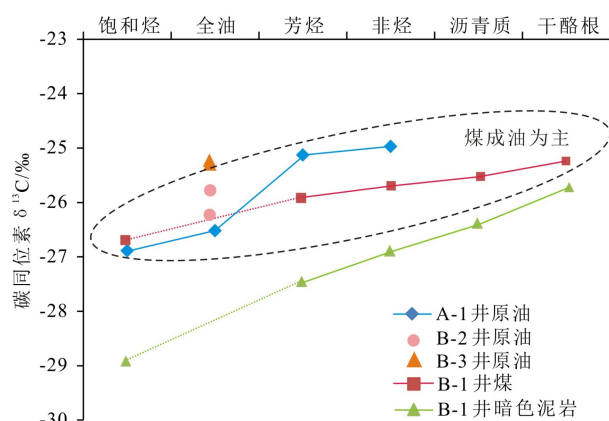


图7 平湖组煤岩、暗色泥岩以及原油的碳同位素特征

Fig.7 Character of carbon isotope of coal rocks, mudstone and oils in Pinghu Formation

四环二萜类化合物,而二萜类化合物认为是树脂来源的标志物,主要来自于裸子植物的树脂^[21],而煤中的树脂体含量较高。同时,在甾烷系列中也检测到了高等植物来源为主的 C_{29} 规则甾烷。通过对比B-4井4314 m原油及烃源岩的生物标志物特征,发现原油与煤岩的生标特征更接近,二萜类化合物均表现为异海松烷占优势,其次为 4β -19-降海松烷和 16β -(H)扁枝烷,而泥岩以 16β -(H)扁枝烷占优势;三环二萜类均有相对较高含量的 C_{20} 及 C_{21} 三环萜烷, C_{23} 三环萜烷含量较低,泥岩则以 C_{23} 三环萜烷占优势;五环三萜烷类化合物均表现出伽马蜡烷含量较低的特点,但煤岩与原油的伽马蜡烷指数更低;甾烷类化合物均以 C_{29} 规则甾烷为主,但原油含有较高的 C_{27} 规则甾烷,这一点与煤及暗色泥岩均有差别,戴卿林等^[22]通过模拟实验发现煤成油在排驱过程中由于色层作用会导致 C_{27} 规则甾烷相对富集,而煤系源岩则以 C_{29} 甾烷为主。综合二萜类、藿烷类及甾烷类化合物生标特征,认为平北地区平湖组原油有较大的煤岩的贡献。

5 结论

(1)西湖凹陷平北地区平湖组煤系烃源岩评价应根据岩性的不同采取不同的评价指标及标准,以生烃潜力为依据建立了本区煤和泥岩的有机质丰度评价标准;评价结果显示煤岩的热解生烃潜力(S_1+S_2)、氢指数(HI)、氯仿沥青“A”均较高,达到中等—好的级别,体现了较高的生烃及生油潜力;暗色泥岩的有机碳TOC、热解生烃潜力(S_1+S_2)、氯仿沥青“A”以及总烃“HC”也较高,同样达到中等—好的级别。

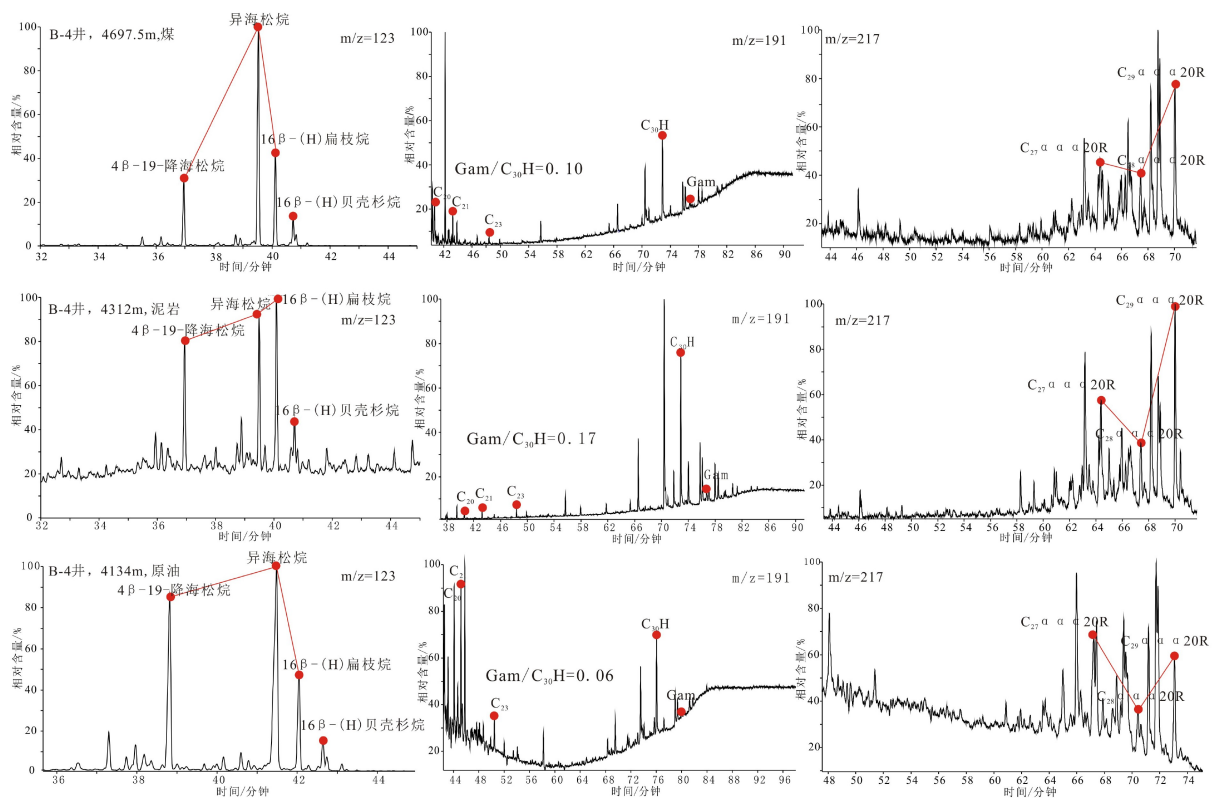


图8 B-4井烃源岩及原油生物标志物特征

Fig.8 Character of source rocks and oil biomarkers of B-4 Well

(2) 西湖凹陷平北地区平湖组煤岩干酪根类型主要为 II₁-II₂ 型, 干酪根中富氢显微组分含量较高, 主要包括较高的壳质组含量以及富氢的镜质体, 且壳质组组分含有较高含量的树脂体, 构成了煤生油的重要物质基础, 所以煤岩具有较高的生油潜力。暗色泥岩的干酪根类型主要为 II₂-III 型, 富氢显微组分较低, 所以暗色泥岩以生气为主, 生油潜力有限。

(3) 根据煤系烃源岩的镜质体反射率 R_o 以及反映有机质演化的生标综合确定平北地区烃源岩的生烃门限为 3 100 m ($R_o=0.55%$); 根据 $(S_1+S_2)/TOC$, 结合镜质体反射率 R_o 综合确定烃源岩排烃门限为 3 500 m ($R_o=0.7%$)。

(4) 对典型的煤岩以及暗色泥岩进行了热模拟实验, 实验结果表明煤具有油气共生的特点, 产油率和产气率均较高, 产油率最高可达 130 mg/g TOC, 产气率可达 125 mg/g TOC; 暗色泥岩以生气为主, 产油率最高仅为 50 mg/g TOC, 产气率可达 185 mg/g TOC。结合生排烃门限划定了烃源岩的热演化阶段。

(5) 平北地区已发现原油碳同位素普遍较重, 与煤岩抽提物的碳同位素更加接近; 同时, 原油饱和烃质谱检测到了来自于被子植物树脂的海松烷、

扁枝烷, 同时已发现原油与煤岩生物标志特征更为一致, 综合认为平北地区已生成原油有较多煤岩的贡献, 煤成油在西湖凹陷广泛存在。

参考文献 (References)

- [1] 史训知, 戴金星, 王则民, 等. 联邦德国煤成气的甲烷碳同位素研究和对我们的启示[J]. 天然气工业, 1985, 5(2): 1-9. [SHI Xunzhi, DAI Jinxing, WANG Zemin, et al. A study of methane carbon isotope of coal-formed gas in FRG and its inspiration to us [J]. Natural Gas Industry, 1985, 5(2): 1-9.]
- [2] Brooks J D, Smith J W. The diagenesis of plant lipids during the formation of coal, petroleum and natural gas-I. Changes in the n-paraffin hydrocarbons [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1967, 31(12): 2389-2397.
- [3] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(14): 1290-1305. [DAI Jinxing. Coal-derived gas theory and its discrimination [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(14): 1290-1305.]
- [4] 黄第藩. 成烃理论的发展-(II)煤成油及其初次运移模式[J]. 地球科学进展, 1996, 11(5): 432-438. [HUANG Difan. Advances in hydrocarbon generation theory-(II) oils from coal and its primary migration model [J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(5): 432-438.]
- [5] Huang D F, Li J C, Zhang D J. Immature oil in Chinese nonmarine

- sediments and significance[M]//Organic Geochemistry Advances and Application in Energy and the Natural Environment. Manchester: Manchester University Press, 1991: 39-47.
- [6] 黄第藩, 卢双舫. 煤成油地球化学研究现状与展望[J]. 地学前缘, 1999, 6(S1): 183-194. [HUANG Difan, LU Shuangfang. Current situation and prospect in geochemistry of oil from coals [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(S1): 183-194.]
- [7] 周洁. 东海盆地西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩地球化学特征[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2012: 1-51. [ZHOU Jie. Geochemical characteristics of Eocene Pinghu formation coal-bearing source rocks in the Xihu depression, East China Sea Basin[D]. Master Dissertation of Zhejiang University, 2012: 1-51.]
- [8] 钱门辉. 西湖凹陷煤系烃源岩生烃特征研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010: 1-99. [QIAN Menhui. A model research of generation of hydrocarbon coal source rock in Xihu depression[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2010: 1-99.]
- [9] 孙伯强, 陈剑新. 东海西湖凹陷保俶斜坡下第三系煤成油的研究[J]. 海洋石油, 2000(1): 1-6. [SUN Boqiang, CHEN Jianxin. Preliminary study on coal-generating oil of Eogene system in the Baochu slope of Xihu sag, East China Sea [J]. Offshore Oil, 2000(1): 1-6.]
- [10] 魏恒飞, 陈践发, 陈晓东, 等. 西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃源岩发育环境及其控制因素[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 487-497. [WEI Hengfei, CHEN Jianfa, CHEN Xiaodong, et al. The controlling factors and sedimentary environment for developing coastal coal-bearing source rock of Pinghu Formation in Xihu depression [J]. Geology in China, 2013, 40(2): 487-497.]
- [11] 陈建平, 赵长毅, 何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(1): 1-5. [CHEN Jianping, ZHAO Changyi, HE Zhonghua. Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential of organic matter in coal measures [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(1): 1-5.]
- [12] 黄第藩. 中国陆相油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 1-355. [HUANG Difan. Oil and Gas Generation in China Continental Deposit[M]. Beijing: China Petroleum Industry Press, 1982: 1-355.]
- [13] 徐春华, 樊庆真, 孔凡顺, 等. 煤系烃源岩评价中的误区[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 78-80. [XU Chunhua, FAN Qingzhen, KONG Fanshun, et al. Misunderstanding on evaluation of coal-measure hydrocarbon source rock [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(1): 78-80.]
- [14] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-618. [QIN Jianzhong. Source Rocks in China[M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-618.]
- [15] 王飞宇, 傅家谟, 刘德汉. 煤和陆源有机质生油岩有机岩石学特点及评价[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(4): 30-35. [WANG Feiyu, FU Jiamo, LIU Dehan. Organic petrological characteristics of coal and terrestrial organic matter and their assessment as a oil source rock [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(4): 30-35.]
- [16] 刘德汉, 傅家谟, 肖贤明. 煤成烃的成因与评价[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 137-141. [LIU Dehan, FU Jiamo, XIAO Xianming. Origin and appraisal of coal derived gas and oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 137-141.]
- [17] 郭黔杰. 煤作为源岩研究时对显微组分的重新认识[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(2): 37-40. [GUO Qianjie. Macerals reconsideration in the studies of "oil from coal" [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(2): 37-40.]
- [18] 杨鹏程, 余学兵, 张传运. 涠西南凹陷D次凹流二段优质烃源岩特征[J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 1-6, 79. [YANG Pengcheng, YU Xuebing, ZHANG Chuanyun. Characteristics of high-quality source rock in Member Liu-2 of D sub-sag in Wexinan sag [J]. Offshore Oil, 2017, 37(1): 1-6, 79.]
- [19] 张景廉. 中国侏罗系煤成油质疑[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(1): 1-8. [ZHANG Jinglian. On the query of coal-formed oil of Jurassic in China [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(1): 1-8.]
- [20] 苏传国, 朱建国, 孟旺才, 等. 吐哈盆地“煤成油”形成机制探讨[J]. 吐哈油气, 2005, 10(1): 14-20. [SU Chuanguo, ZHU Jianguo, MENG Wangcai, et al. Discussion on generation mechanism of coal-formed oil in Turpan-Hami Basin [J]. Tuha Oil & Gas, 2005, 10(1): 14-20.]
- [21] 傅宁. 东海盆地西湖凹陷煤系烃源岩及凝析油中的二萜化合物[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(1): 21-28. [FU Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu sag of East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(1): 21-28.]
- [22] 戴卿林, 郝石生, 卢双舫, 等. 煤成油油源对比问题讨论[J]. 地球化学, 1996, 25(4): 324-330. [DAI Qinglin, HAO Shisheng, LU Shuangfang, et al. Discussions about the correlation of oils from coals and their sources [J]. Geochimica, 1996, 25(4): 324-330.]