

文章编号: 0253-2697(2012)01-0032-08

西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征

朱扬明 周 洁 顾圣啸 李 颖

(浙江大学地球科学系 浙江杭州 310027)

摘要:60 个饱和烃和芳烃组分的 GC-MS 分析资料表明,东海盆地西湖凹陷平湖组煤系烃源岩饱和烃中富含源于针叶树脂的二萜烷类生物标志物,甾烷中普遍以 C_{29} 化合物占优势($>45\%$),芳烃组分中萜烯、1,7-二甲基菲等陆源标志物含量异常高,这些结果反映该煤系烃源岩的成烃母质主要来源于陆源高等植物。相对于煤及碳质泥岩,暗色泥岩中 C_{27} 甾烷有较高含量,且正构烷烃呈双峰型分布,说明其有机质生物源中水生生物占有一定比例。该煤系烃源岩的 Pr/Ph 值大多分布在 3.5~8.5,二苯并呋喃类化合物较多,指示这套烃源层主要形成于氧化性较强的湖沼相环境;部分暗色泥岩 Pr/Ph 值在 1.5 左右,可能属弱还原—弱氧化的半深湖相沉积。煤及碳质泥岩以高 C_{29} 甾烷(大于 80%)、低伽马蜡烷(与 C_{30} 藿烷的比值低于 0.05)与暗色泥岩形成区别。

关键词:西湖凹陷;煤系烃源岩;生物标志物;芳烃;有机质生物源;东海陆架盆地

中图分类号:TE112.11

文献标识码:A

Molecular geochemistry of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin

ZHU Yangming ZHOU Jie GU Shengxiao LI Ying

(Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract:GC/MS analytical data of 60 saturated and aromatic fractions revealed that saturated hydrocarbons from Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression of the East China Sea Shelf Basin are characterized by abundant diterpenoid compounds originated from resins of coniferous trees and dominant C_{29} in steranes($>45\%$). Moreover, aromatic fractions are abnormally rich in terrigenous biomarkers, such as retene and 1,7-dimethylphenanthrene, indicating a predominant source of organic matter derived from terrigenous higher plants. Compared with coals and carbonaceous mudstones, dark mudstones show a relatively higher content of C_{27} sterane and a bimodal distribution in n-alkanes, suggesting a certain proportion of aquatic organism contributions in the organic matter source. Source rocks as a whole are believed to be deposited in an oxic limnetic-facies environment, as reflected by high Pr/Ph ratios ranging mostly from 3.5 to 8.5 and abundant dibenzofuranes. However, some dark mudstones show relatively lower Pr/Ph values (round 1.5), suggesting a weakly reducing to suboxic semi-deep lake setting. Coals and carbonaceous mudstones can be distinguished from dark mudstones by a higher relative concentration of C_{29} sterane ($>80\%$) and lower gammacerane/ C_{30} hopane ratio (<0.05).

Key words:Xihu Depression; coal-bearing source rock; biomarker; aromatic hydrocarbon; biological source of organic matter; East China Sea Shelf Basin

西湖凹陷位于东海陆架盆地的浙东坳陷中部,是该盆地油气勘探潜力最大的凹陷之一。该凹陷油气勘探始于 1974 年,目前已发现了平湖、春晓等 8 个油气田及 6 个含油气构造,获石油地质储量约 $3\ 000 \times 10^4$ t,天然气储量约 $1\ 000 \times 10^8$ m³[1]。凹陷发育有多套第三系烃源层,其中,形成于海侵背景下的始新统平湖组煤系烃源岩分布广、厚度大,所含有机质丰度较高,且热演化程度多在成熟—高成熟阶段,经油源对比和油气勘探实践被证实为该凹陷的主力烃源岩[2-3]。这套烃源岩干酪根中镜质组及惰质组丰富,而腐泥组和壳质组较少;饱和烃中富含二萜烷类化合物[3],具有

中国第三系煤系烃源岩显微有机组分和生标组成的一般特点。笔者采集了代表性探井的平湖组暗色泥岩、煤及碳质泥岩样品,系统进行了饱和烃生物标志物和芳烃化合物的分析,拟在分子水平上全面揭示这套煤系烃源岩生烃母质的组成特征,并探讨各类岩性烃源岩有机质生物源构成及其沉积环境性质的区分标志,为研究区油气源的精细对比提供依据。

1 地质、地球化学背景及样品

西湖凹陷地处上海市以东的东海大陆架海域,在地质构造上,其东为钓鱼岛隆褶带,西为海礁隆起,南

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目“海上油气地球化学快速探测技术”(2007AA09Z308)资助。

第一作者及通讯作者:朱扬明,男,1954 年 11 月生,1997 年获中国科学院广州地球化学研究所博士学位,现为浙江大学地球科学系教授、博士生导师,主要从事有机地球化学研究与教学工作。E-mail:zyiming@zju.edu.cn

临钩北凹陷,北与福江凹陷毗邻。该凹陷是中生代末热隆起背景上形成的裂隙,具有先断后拗的演化特征^[4]。整个凹陷呈 NNE 向展布,东西宽约 80 km,南北长约 360 km,面积为 $4.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。凹陷从西往东可分成 5 个二级构造单元带,即保俶斜坡带、三

潭深凹、浙东中央背斜带、白堤深凹和天屏断裂带。凹陷沉积岩厚约万米,自下而上为古新统,中下始新统宝石组,中上始新统平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组和第四系东海群。其前第三系基底主要为前寒武系变质岩及古生界变质岩系。

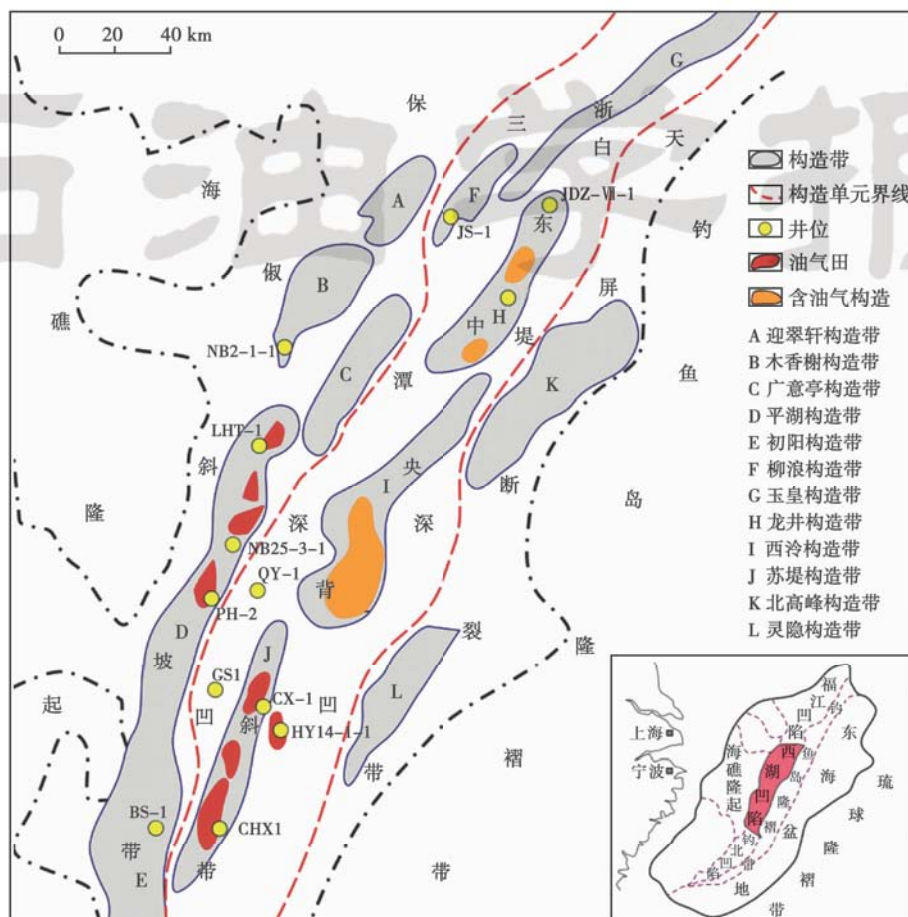


图 1 西湖凹陷构造单元及油气田分布(改编自贾健谊等^[5])

Fig. 1 The distribution of tectonic units and oil & gas fields in Xihu Depression

西湖凹陷平湖组烃源岩的岩性为暗色泥岩、煤及碳质泥岩。暗色泥岩呈凹陷中心区厚、向隆起和斜坡区以环带状减薄趋势,累计厚度为 200~1800 m,厚度大于 1000 m 的泥岩层分布面积超过 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$;煤及碳质泥岩主要分布于凹陷周缘,厚度一般为 30~50 m,局部地区厚度超过 50 m^[1,6]。暗色泥岩的有机碳含量多数分布在 0.5%~5.0%,平均值为 1.03%;生油潜量($S_1 + S_2$)值大都变化在 0.5~15.0 kg/t,平均值为 1.86 kg/t;氯仿沥青“A”含量为 0.01%~0.20%,平均值 0.054%。与有机碳含量相比,后两项有机质丰度参数值显得较低,反映出煤系泥岩生液态烃量偏低的特点。碳质泥岩和煤的有机碳含量分别为 5.0%~29.1% 和 31.7%~72.9%,平均值分别为 12.6% 和 51.3%;生油潜量分别在 5.8~111 kg/t、56.1~216 kg/t,平均值分别为 35.4 kg/t、143.3 kg/t;氯

仿沥青“A”含量分别为 0.12%~1.34%、0.226%~8.31%,平均值分别为 0.528%、2.217%。据计算,煤及碳质泥岩的油、气资源量分别占 64.7%、58.9%,弥补了暗色泥岩生烃量的不足^[7]。平湖组暗色泥岩的成烃母质类型以Ⅲ型为主,部分层段和区域为Ⅱ₂型;煤及碳质泥岩为Ⅲ型,总体上属于“倾气型”烃源岩^[8]。这套烃源岩实测的 R_o 值主要变化为 0.5%~1.3%,相应的岩石热解最高峰温 T_{max} 值主要分布在 430~460℃,成熟度整体上处于生油—凝析气演化阶段,凹陷中心区热演化程度可能更高些。

西湖凹陷目前发现的油气藏主要分布在保俶斜坡带中南部和浙东中央背斜带南部。原油大都为凝析油或轻质油,也见有正常原油,原油密度为 0.76~0.82 g/cm³,具有含硫量低(0.02%~0.10%)、含蜡量低(2%~8%)和凝固点低(-19~0℃)的特点。天然气以烃类气体为

主,甲烷含量高于95%,不含或微含 H_2S 、 CO_2 含量低。烷烃气的 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 值分别分布在 -33% ~ -40% 、 -25% ~ -30% ,显示出煤型气碳同位素的特点。

本次研究的平湖组烃源岩样品主要取自三潭深凹西侧的NB25-1-1井、NB25-3-1井和白堤深凹南部的HY14-1-1井钻井岩屑。这3口井所取样品深度分别在3330~4140 m、3070~3825 m和3660~3870 m,实测的 R_o 分别为0.64%~0.73%、0.55%~0.68%、0.87%~1.06%, T_{max} 值分别为429~443℃、425~435℃、445~454℃,有机质热演化程度在低成熟—生油高峰阶段。

在60余个暗色泥岩、煤及碳质泥岩样品常规分析的基础上,选取了30个代表性样品进行了氯仿沥青“A”抽提。抽提物用石油醚沉淀去除沥青质后,在硅胶/氧化铝层析柱上分别用石油醚、二氯甲烷和三氯甲烷/乙醇分离出饱和烃、芳烃和非烃组分。饱和烃和芳烃组分的气相色谱—质谱(GC-MS)分析在Agilent 6890N-5973MSD色谱/质谱联用仪上完成,所用色谱柱分别为30 m×0.25 mm DB-5MS和30 m×0.25 mm HP-5MS石英毛细管柱,载气为氦气,电子轰击源。

2 生物标志物组成

2.1 正构烷烃与类异戊二烯烃

西湖凹陷平湖组烃源岩正构烷烃系列化合物的碳数大都在 C_{13} — C_{35} 范围。在低成熟(R_o 约0.6%)的不同岩性样品中,该系列化合物具有明显不同的分布模式。典型的湖相暗色泥岩呈双峰型分布,主峰碳数一般为 C_{16} 和 C_{29} ,高碳数化合物有明显的奇碳优势[图2(a)],OEP值在2.0左右,表明有机质具水生生物和陆源高等植物双重来源。一些成熟度相当的滨浅湖相暗色泥岩中高碳数正构烷烃相对升高,意味着陆源有机质的输入比例增加。所分析的NB25-3-1井碳质泥岩正构烷烃也呈双峰型,可能因成熟度稍高的缘故在分布上类似于同井的暗色泥岩[图2(b)]。煤中的正构烷烃呈后峰型分布,碳数低于 C_{20} 的化合物很少,以高碳数的同系列为主[图2(c)], C_{21}^-/C_{22}^+ 值低于0.5,反映其有机质生物源以陆源高等植物为主。在中等成熟阶段(R_o 为0.8%~1.1%)的不同岩性烃源岩中,它们的正构烷烃趋于相似的分布,煤与相近演化程度的泥岩没有区别[图2(d)]。可见,正构烷烃对沉积有机质生物源的指示意义,只能在低成熟烃源岩中反映出来。

这些烃源岩中类异戊二烯烃系列化合物的相对含量随成熟度有较大变化。低成熟样品中姥鲛烷(Pr)在饱和烃色谱图中为主峰,远高于邻近的正构烷烃,相应的Pr/ nC_{17} 比值在1.0以上。而中等成熟的烃源

岩中,由于干酪根裂解释放出大量正构烷烃,导致Pr/ nC_{17} 比值明显下降。所分析的烃源岩均呈姥鲛烷优势,Pr/Ph值都在1.0以上。其中,暗色泥岩中除两个样品Pr/Ph值在1.5左右外,其他都在3.0以上,分布在3.5~7.5,比中国一般的第三系湖相泥岩Pr/Ph值(大多在1~3)高得多,表明煤系泥岩的沉积环境氧化性较强。煤的Pr/Ph值总体上高于暗色泥岩,均在5.0以上,变化在5.6~12.5,指示氧化性更强的沼泽相沉积环境性质。NB25-3-1井的两个碳质泥岩样品的Pr/Ph值也很高,分别为8.2与8.5。

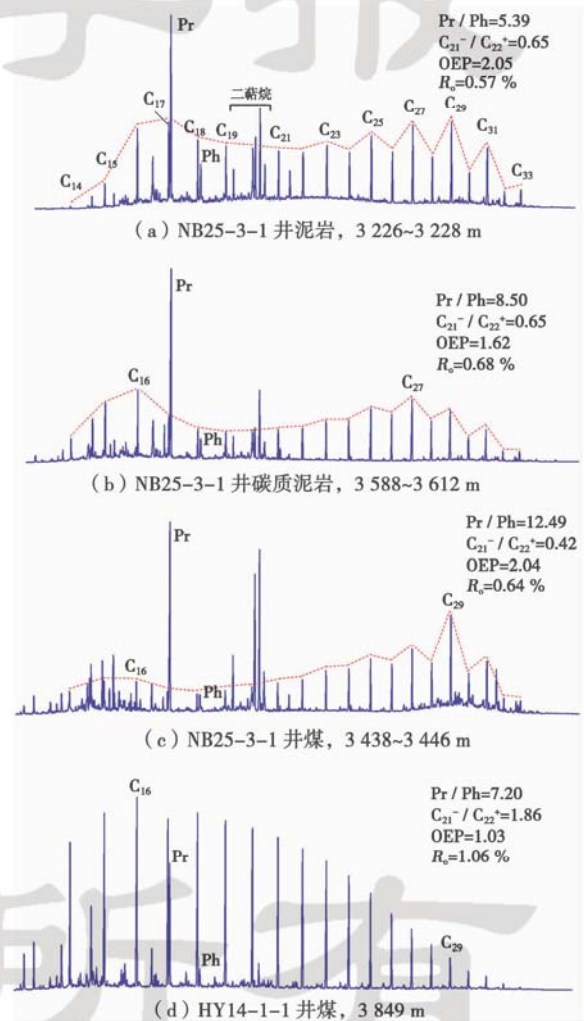


图2 平湖组不同岩性烃源岩饱和烃气相色谱

Fig. 2 Gas chromatograms of saturated fractions in various source rocks of Pinghu Formation in Xihu Depression

2.2 二萜烷类陆源标志物

该凹陷平湖组煤和泥岩中均存在含量很高的二萜烷类化合物,且类型多样,成为这些烃源岩生标组成的一个重要特点,同时反映出该地层有机质生源构成的特殊性。检出的二萜烷类化合物可分为二环二萜烷、三环二萜烷和四环二萜烷(图3)。这些化合物中除傅宁^[9]在同一地区烃源岩检出的外,还包括一个 C_{19} -降四环二

萜烷化合物(4号峰),其确切的碳骨架类型尚不能确定^[10];另外,一些样品中存在一个可能是松香烷的化合物(10号峰);在所分析的烃源岩中没有检出白叶烷。

这些二萜烷化合物在低成熟样品中含量很高,在饱和烃色谱图上的峰群(位于C₁₉—C₂₁正构烷烃之间)相近或高于相邻的正构烷烃(图2)。随热演化程度的增加,其相对含量明显减少,表明它们可能形成于低演化阶段,并主要以游离烃的形式存在。经比较,成熟度相当的煤中二萜烷化合物丰度要高于泥岩。

不同类型烃源岩中二萜烷化合物的分布有所变化。在HY14-1-1井中等成熟的泥岩样品中,C₁₉降异海松烷[图3(a)中2号峰]较少,低于C₂₀异海松烷(5号峰),C₁₉/C₂₀异海松烷比值基本在1.0以下。而该井煤中这两化合物的分布正相反,即降异海松烷高于

异海松烷。C₁₉降异海松烷可能由C₂₀针叶树脂酸先质物经脱羧、还原而来,而C₂₀异海松烷则由其先质物通过羧基直接还原所形成^[10-11]。两类岩性中这两化合物相对分布上的不同,可能与沉积环境的氧化—还原性及矿物基质有关。另外,该井两类岩性烃源岩中C₁₉17-降四环二萜烷(4号峰)相对含量也明显不同,在泥岩中普遍较多,而煤中均较少。然而,NB25-3-1井的低成熟泥岩与煤中,这些二萜烷分布的变化不明显,它们的C₁₉、C₂₀异海松烷化合物含量相近,17-降四环二萜烷均很少[图3(c)和(e)]。这表明影响这些化合物分布的因素比较复杂。

平湖组烃源岩检出的二萜烷类化合物来自多种科属的针叶树脂,半日花烷类和异海松烷类先质物存在于除三尖杉科以外的所有针叶树中;而扁枝烷和贝壳杉烷类的二萜烷被认为主要来源于罗汉松科和南洋杉科树脂^[12],可能与杉科、柏科也有成因联系^[13]。这些针叶树在第三纪都很繁盛,该套烃源岩中树脂体多者可达干酪根显微组分总量的10%左右^[14]。

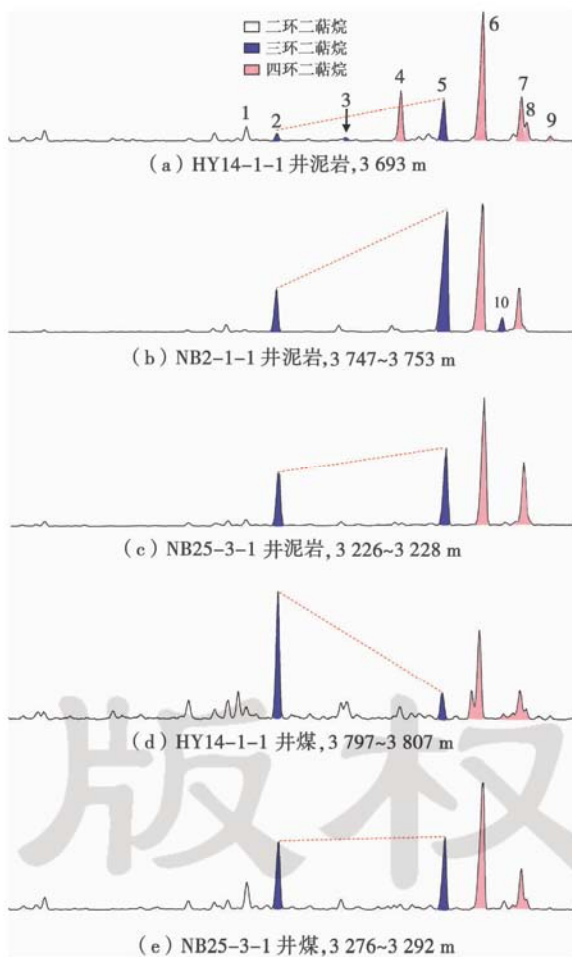
2.3 五环三萜烷

这些烃源岩中都含有丰富的藿烷系列化合物,藿烷/甾烷比值均在2.5以上,具有一般陆相沉积有机质的生标组成特点。相对于C₂₇17 α (H)-三降藿烷(Tm)化合物,各类烃源岩,尤其是煤的C₂₇18 α (H)-三降藿烷(Ts)大都很少(图4),Ts/Tm比值基本都在0.5之下。对于正常成熟度烃源岩(R_o为0.6%~1.1%)来说,显得明显偏低,可能与煤系地层的沉积环境有关。高碳数藿烷化合物均随碳数增加急剧递减,其中煤的这种碳数变化趋势更为显著,所含的C₃₄、C₃₅藿烷化合物极少,反映出氧化沉积环境有机质的一般特点。成熟度较低的不同岩性烃源岩,C₃₁藿烷的分布存在差别,煤及碳质泥岩样品中该化合物较高,表征细菌生物源;而在热演化程度相近的暗色泥岩中通常较少(图4);随热演化程度增加,这种差别逐渐消失。

在西湖凹陷平湖组烃源岩中伽马蜡烷的丰度具有特征性意义。煤及碳质泥岩中伽马蜡烷极少,与C₃₀藿烷的比值都在0.05以下,低者仅有0.01;而在泥岩中相对较多,伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值大多高于0.05,高者可达0.2;可作为两类烃源岩的区分标志。伽马蜡烷实质上是指示沉积水体分层的标志,在水体化学跃层内及之下的厌氧环境中厌氧纤毛虫繁盛,能合成大量的伽马蜡烷先质物四膜虫醇^[15]。煤层形成于沼泽环境,水体浅且动荡性强不可能分层,因而该化合物极少。

2.4 甾烷

所分析的烃源岩样品中均以C₂₉甾烷占优势,相对含量都在45%以上,变化为45.2%~87.3%;而C₂₇



1—8 β (H)-半日花烷;2—4 β (H)-19-降异海松烷;3—朽松木烷;4—17-降四环二萜烷;5—异海松烷;6—16 β (H)-扁枝烷;7—16 β (H)-贝壳杉烷;8—16 α (H)-扁枝烷;9—16 α (H)-贝壳杉烷;10—松香烷。

图3 平湖组烃源岩二萜烷化合物分布(m/z123)

Fig. 3 Distribution of diterpenoid hydrocarbons of saturated fractions in various source rocks of Pinghu Formation in Xihu Depression

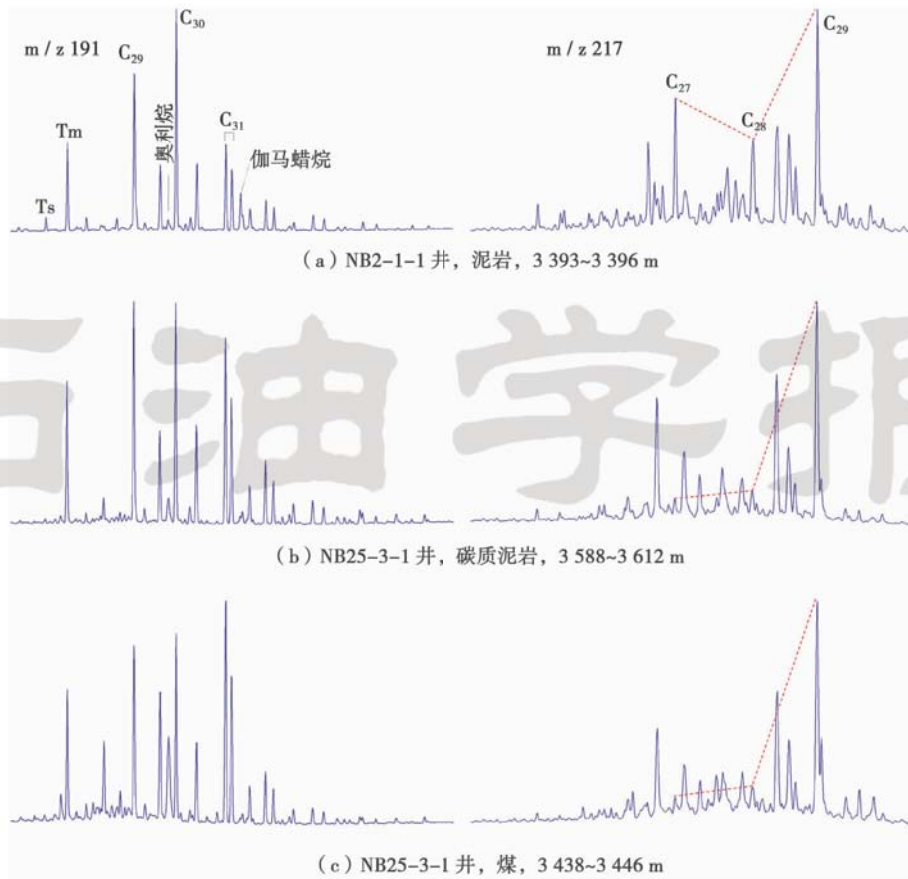


图4 平湖组不同岩性烃源岩甾烷(m/z217)和萜烷化合物(m/z191)分布

Fig. 4 Distribution of terpanes and steranes in m/z191 and m/z217 mass chromatograms of saturated fractions in various source rocks of Pinghu Formation in Xihu Depression

甾烷较少,分布在2.8%~31.8%;表明总体上这套煤系烃源岩的有机质生源都以陆源高等植物为主,不同岩性烃源岩的甾烷碳数分布模式及相对组成有明显区别(图4)。暗色泥岩样品中虽C₂₉甾烷占优势,但C₂₇、C₂₈甾烷也有一定含量,在m/z 217质量色谱图上三者呈不对称的“V”字型分布,C₂₇、C₂₈、C₂₉甾烷的相对含量分别为10.0%~31.8%、13.0%~26.2%、45.2%~76.9%,说明其生物源中有比例不等的水生生物。煤中C₂₇和C₂₈甾烷极少,相对含量分别只有2.8%~7.2%和8.5%~12.0%;而C₂₉甾烷占绝对优势,相对含量均在80%以上,变化在80.9%~87.3%;在碳数分布上形成煤特有的倒“L”字型分布模式。所分析的两个碳质泥岩甾烷相对组成接近于煤,C₂₇、C₂₈、C₂₉甾烷的相对含量分别为7.9%、13.5%、78.5%和5.6%、10.8%、83.6%。

通过不同成熟度样品的比较表明,在低成熟—生油高峰演化阶段(R_o为0.6%~1.1%),不同类型烃源岩的甾烷(αααR构型)碳数分布和相对组成基本不受成熟度影响。因而,与上述其他生物标志物相比,该系列化合物在判别有机质生物源及类型方面

更具有实用价值。

2.5 生标在油源对比中的意义

据现有分析资料,西湖凹陷原油的Pr/Ph值主要集中在5~10,部分为1~5,少数高于10。它们富含各类二萜烷化合物,三环二萜烷主要以降海松烷和异海松烷为主,四环二萜烷以16β(H)构型的扁枝烷和贝壳杉烷为主。其甾烷系列中,多数以C₂₉甾烷占优势,C₂₇、C₂₈甾烷较少,三者大都呈倒“L”字型分布,少数呈不对称的“V”字型分布。大部分原油中伽马蜡烷都极少,伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值在0.05以下,仅少数原油高于0.05。

从上述生物标志物组成和分布特征可看出,平湖组煤系烃源岩的生标组合与原油具有很好的对比性,结合其他资料,可认为原油主要来源于该套烃源岩。其中,煤及碳质泥岩的生标分布特征与大部分原油更为接近,可能对油源的贡献更大。

3 芳烃化合物组成特征

3.1 芳烃陆源有机质标志物

由于成煤的酸性环境有利于某些特殊的烷基萘、菲化合物的形成,因而本区NB25-3-1井低成熟平湖组煤系烃源岩中芳烃化合物显示出独特的组成。在萘系

列中,萘、甲基萘和二甲基萘等常规化合物很少,而在三甲基、四甲基萘系列中 1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘异常突出,在色谱图上其峰高明显高于其他同系列异构体(图 5)。这两个烷基萘化合物被认为是由高等植物三萜类先质物演变而来^[16],也可能由针叶树脂中的二环二萜类化合物通过芳构化作用形成^[17]。这些烃源岩中同以萘为碳环骨架的卡达烯(4-异丙基-1,6-二甲基萘)也很高,其在高等植物树脂中尤为丰富,因而常作为高等植物生物源的标志物^[18]。

这些烃源岩在非系列化合物组成上也显得很特别,甲基菲系列中 1-甲基菲异常高,远高于其他异构体,1-/9-甲基菲比值大多在 1.5 以上。相比于泥岩,煤中这种分布特征尤为显著,其 1-甲基菲高于相邻的 9-甲基菲,可达 3 倍左右(图 5)。这样异常的甲基菲分布与有机质来源有关,1-甲基菲可能来自针叶树脂中

的贝壳杉烷和扁枝烷类先质物的演化,在Ⅲ型有机质,尤其是富含树脂体的煤中很丰富^[19]。二甲基菲系列中,1,7-二甲基菲远高于同系列的其他异构体,该化合物被认为与树脂体中的海松酸有关,通常在煤系地层中较多^[19]。

作为典型陆源高等植物标志物的惹烯(7-异丙基-1-甲基菲)含量异常高,在这些低成熟烃源岩芳烃组份色谱图中为主峰。该化合物虽可能还有其他来源^[20],但常被认为是由松香酸通过部分降解转变而来。这些烃源岩中惹烯之所以如此丰富,可能还与沉积环境较强的氧化性有关,因为惹烯一般在含氧环境中形成^[21]。

这些平湖组煤系烃源岩中上述芳烃化合物的分布,表征其有机质生物源中陆源高等植物占优势,与饱和烃生物标志物所指示的意义相一致。但要指出的是,芳烃化合物的上述组成特征随烃源岩热演化程度的升高而发生明显变化。在成熟度相对较高的 HY14-1-1 井烃源岩中,1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘在热力作用下发生了甲基迁移或断裂转变成其他烷基萘化合物而减少。1,7-二甲基菲及 1-甲基菲的优势分布也有所减弱,但仍较显著[图 5(d)]。可能是卡达烯和惹烯结构中的异丙基容易断裂的缘故,这两化合物在较高成熟度样品中大量减少,基本失去了有机质生物源的指示意义。

3.2 含硫、含氧芳烃化合物组成及沉积环境区分

二苯并噻吩和二苯并呋喃系列是烃源岩中最常见的两类含杂原子芳烃化合物。前者是成熟烃源岩中含硫有机化合物的主要存在形式,后者主要来源于陆源植物及微生物、真菌中聚糖的演化^[22-23],也可能由联苯与氧和亚甲基通过在碳质物表面的催化反应而成^[24]。它们的含量均随沉积环境性质而变^[25],Radke 等^[23]提出可利用甲基二苯并噻吩/甲基二苯并呋喃比值(MDBTs/MDBFs),结合 Pr/Ph 值区分沉积环境。

所分析的烃源岩样品中,甲基二苯并噻吩系列较少,而甲基二苯并呋喃系列较丰富,两者的比值(MDBTs/MDBFs)均在 1.0 以下,变化在 0.04~0.90,多数低于 0.10(图 6)。而且,这些 MDBTs/MDBFs 比值随 Pr/Ph 值的增高整体上呈明显的降低趋势,表明该比值除有机质生源外,确实与沉积环境的氧化—还原性有关。煤及碳质泥岩中 MDBTs/MDBFs 比值均在 0.21 以下,相应的 Pr/Ph 值都在 5.5 以上,与其强氧化性的沼泽—三角洲相沉积环境一致。暗色泥岩中 MDBTs/MDBFs 比值有较大变化,低者不足 0.1,高者达 0.9,意味着它们形成于不同的沉积相带。其中,少数 MDBTs/MDBFs 比值相对较高,且 Pr/Ph 值小

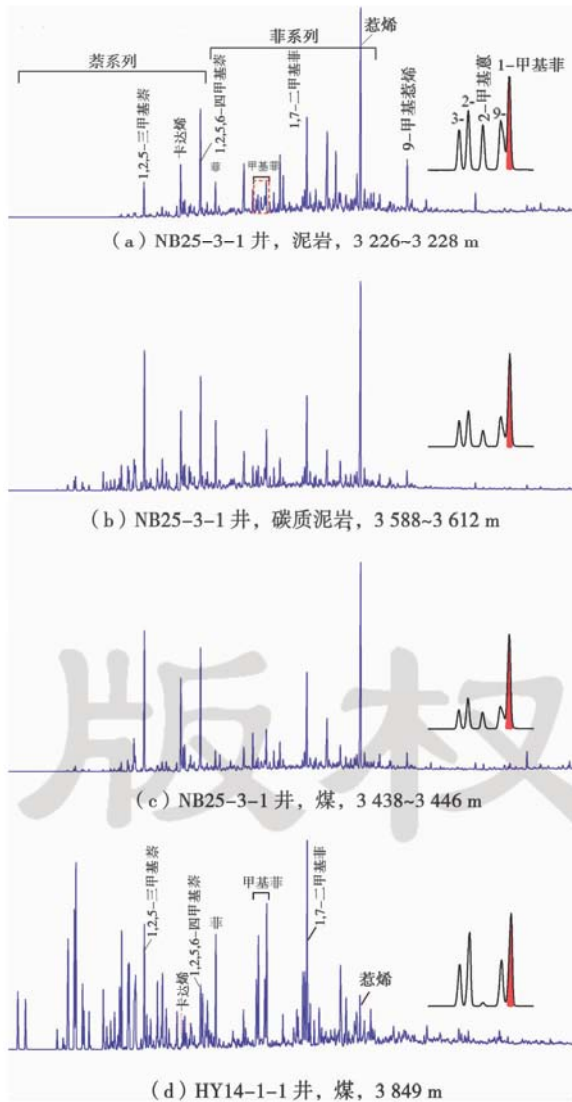


图 5 平湖组不同类型烃源岩芳烃化合物分布

Fig. 5 Distribution of aromatic hydrocarbons in various source rocks of Pinghu Formation

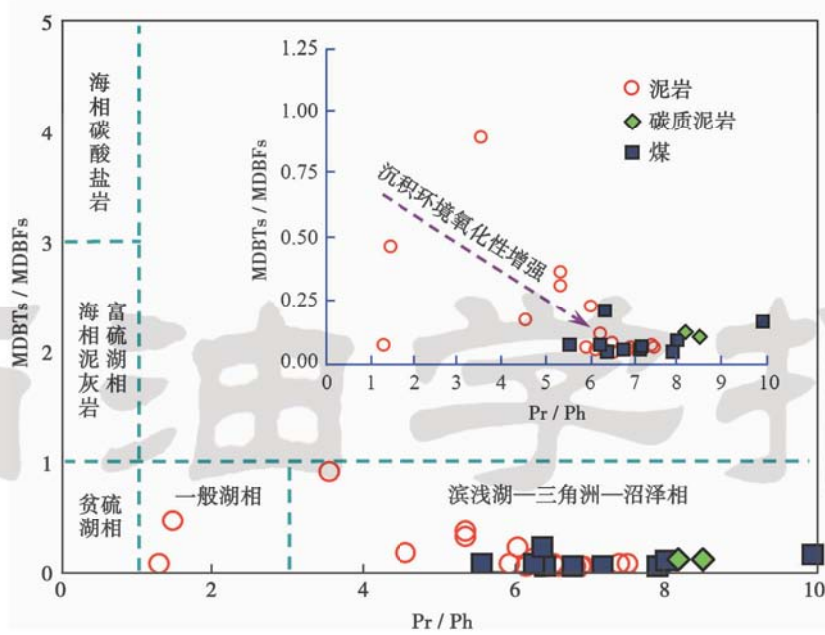


图6 西湖凹陷平湖组煤系烃源岩 MDBTs/MDBFs 与 Pr/Ph 比值分布

Fig. 6 Distribution of MDBTs/MDBFs and Pr/Ph ratios in coal-bearing source rocks of Pinghu Formation in Xihu Depression

于 3.0 的泥岩,可能沉积于弱还原—弱氧化的半深湖环境。大部分泥岩的 MDBTs/MDBFs 比值都较低, Pr/Ph 值(3.5~7.5)均较高,可能属氧化性较强的滨浅湖相沉积,反映出煤系泥岩的沉积环境特点。

上述两类含杂原子芳烃的相对含量受成熟度影响。烃源岩中二苯并噻吩系列化合物的含量在成熟阶段变化不大;而二苯并呋喃类化合物的形成基本上与液态烃的生成同步,在低成熟阶段较少,之后逐渐增高,在生油高峰期后的较高成熟阶段,因热催化降解作用其含量又相对较低^[23]。因而,不同成熟度的同类烃源岩中这两类化合物的比值有所变化。但在所研究样品的成熟度范围,成熟度因素没有明显影响该比值的总体分布。

4 结论

(1) 西湖凹陷平湖组煤系烃源岩的有机质生物源以陆源高等植物输入为主,成烃母质应属腐殖型。饱和烃中富含源于针叶树脂的二萜烷类生物标志物,甾烷中普遍以 C_{29} 甾烷占优势(>45%);芳烃组分中萘烯、1,2,5-三甲基萘、1,7-二甲基菲等陆源标志物含量异常高。相对于煤及碳质泥岩,暗色泥岩中 C_{27} 、 C_{28} 甾烷有一定含量,且正构烷烃呈双峰型分布,表明水生生物有机质对其成烃母质有比例不等的贡献。

(2) 这套烃源层主要形成于氧化性较强的淡水湖沼相沉积环境。均呈显著的姥鲛烷优势, Pr/Ph 值大多分布在 3.5~8.5 范围;其二苯并呋喃类化合物较多, MDBTs/MDBFs 比值均在 1.0 以下。部分暗色泥

岩 Pr/Ph 值在 1.5 左右,应属弱还原—弱氧化的半深湖相沉积。

(3) 本区平湖组不同岩性类型烃源岩之间存在明显的识别标志。煤及碳质泥岩甾烷中以 C_{29} 甾烷占绝对优势为特征,相对含量高于 80%;其伽马蜡烷极少,与 C_{30} 藿烷的比值都在 0.05 以下。而暗色泥岩中 C_{29} 甾烷相对含量均在 80% 以下;伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值大多高于 0.05。

参考文献

- [1] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景[M]//姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探论文集. 北京:石油工业出版社, 2004:3-8.
Jiang Liang. Exploration status and perspective of petroleum resources in East China Sea shelf basin[M]//Jiang Liang. Proceedings of petroleum resources exploration in East China Sea shelf basin. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004:3-8.
- [2] 叶加仁,顾惠荣,贾健谊. 东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 111-116.
Ye Jiaren, Gu Huirong, Jia Jianyi. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu depression, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 111-116.
- [3] 刘道燕. 东海陆架盆地烃源岩及其烃类特点[M]//姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探论文集. 北京:石油工业出版社, 2004: 181-187.
Liu Daoyan. Characteristics of source rocks and their hydrocarbons in East China Sea continental shelf basin[M]//Jiang Liang. Proceedings of petroleum resources exploration in East China Sea shelf basin. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004: 181-187.

- [4] 杨凤丽,王敏雪,庄建建,等. 西湖凹陷反转构造定量运动学过程及对油气的控制作用[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 596-601.
Yang Fengli, Wang Minxue, Zhuang Jianjian, et al. Kinematical processes of inversion structure and its contribution to hydrocarbon accumulation in Xihu Depression of East China Sea Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 596-601.
- [5] 贾健谊,顾惠荣. 东海西湖凹陷含油气系统与油气资源评价[M]. 北京:地质出版社, 2002: 41.
Jia Jianyi, Gu Huirong. Oil & gas bearing system and petroleum resources evaluation of Xihu depression, East China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 41.
- [6] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及油气远景[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 1-5.
Jiang Liang. Exploration status and perspective of petroleum resources in East China Sea shelf basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(1): 1-5.
- [7] 陈斯忠. 东海盆地主要地质特点及找气方向[M]//姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探论文集. 北京:石油工业出版社, 2004: 9-18.
Chen Sizhong. Main geological characteristics and gas exploration directions in East China Sea basin [M]//Jiang Liang. Proceedings of petroleum resources exploration in East China Sea shelf basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 9-18.
- [8] 邓运华. 试论中国近海两个坳陷带油气地质差异性[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 1-8.
Deng Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 1-8.
- [9] 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.
- [10] Noble R A, Alexander R, Kagi R I, et al. Identification of some diterpenoid hydrocarbons in petroleum [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 825-829.
- [11] Livsey A, Douglas A G, Connan J. Diterpenoid hydrocarbons in sediments from an offshore (Labrador) well [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 73-81.
- [12] Noble R A, Alexander R, Kagi R I, et al. Tetracyclic diterpenoid hydrocarbons in some Australian coals, sediments and crude oils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(10): 2141-2147.
- [13] Otto A, Walther H, Puttmann W. Sesqui- and diterpenoid biomarkers preserved in Taxodium-rich Oligocene oxbow lake clays, Weissensteiner basin, Germany [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(1/2): 105-115.
- [14] 姜亮. 东海陆架盆地第三系煤系烃源岩油气生成与聚集[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 37-41.
Jiang Liang. Study on hydrocarbon generating, migration and accumulation of the Tertiary source rocks in the East China Sea Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 37-41.
- [15] Damste J S S, Kenig F, Koopmans M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1895-1900.
- [16] Puttmann W, Villar H. Occurrence and geochemical significance of 1, 2, 5, 6-tetramethylnaphthalene [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(11): 3023-3029.
- [17] Strachan M G, Alexander R, Kagi R I. Trimethylnaphthalenes in crude oils and sediments: Effects of source and maturity [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(5): 1255-1264.
- [18] van Aarssen B G K, Alexander R, Kagi R I. Higher plant biomarkers reflect palaeovegetation changes during Jurassic times [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(8): 1417-1424.
- [19] Heppenheimer H, Steffens K, Puttmann W, et al. Comparison of resinite-related aromatic biomarker distributions in Cretaceous-Tertiary coals from Canada and Germany [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(3): 273-287.
- [20] Romero-Sarmiento M-F, Riboulleau A, Vecoli M, et al. Occurrence of retene in Upper Silurian-Lower Devonian sediments from North Africa: Origin and implications [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(3): 302-306.
- [21] Simoneit B R T, Grimalt J O, Wang T G, et al. Cyclic terpenoids of contemporary resinous plant detritus and of fossil woods, ambers and coals [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 877-889.
- [22] Sephton M A, Looy C V, Veeffkind R J, et al. Cyclic diaryl ethers in a Late Permian sediment [J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(4): 267-273.
- [23] Radke M, Vriend S P, Ramanampisoa L R. Alkyldibenzofuranes in terrestrial rocks: Influence of organic facies and maturation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(2): 275-286.
- [24] Asif M, Alexander R, Fazeelat T, et al. Sedimentary processes for the geosynthesis of heterocyclic aromatic hydrocarbons and fluorines by surface reactions [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(5): 522-530.
- [25] 郭小文,何生,石万忠. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 52-57.
Guo Xiaowen, He Sheng, Shi Wanzhong. Aromatic geochemistry characteristics of light oils from Panyu Lower Uplift in Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 52-57.