

东海盆地西湖凹陷平北斜坡带平湖组煤系原油地球化学特征与油-源精细对比

李天军^{1,2}, 黄志龙^{1,2}, 郭小波³, 赵静^{1,2}, 蒋一鸣⁴, 谭思哲⁴

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030]

摘要:东海盆地西湖凹陷平北斜坡带平湖组煤系原油性质及分布规律复杂, 烃源岩纵、横向沉积环境及生物来源非均质性强, 具有斜坡带和西次凹多源供烃特征。将地质与地球化学相结合, 进行了原油类型划分与油-源精细对比, 梳理了原油分布与生烃次注的关系。结果表明: 平北地区原油以凝析油为主, 含少量轻质油和正常原油, 根据生物标志化合物特征, 可划分为3种类型。Ⅰ类原油主要分布在孔雀亭地区, 主要来源于陆源高等植物的裸子植物松柏目树脂, 与本地平湖组中段下亚段(平中下亚段)-平湖组下段(平下段)烃源岩具有明显亲缘关系。Ⅱ₁类原油主要分布在武云亭地区的平上段及平中上亚段和NB8注陷, 具有陆源裸子植物和蕨类植物双重贡献, 且蕨类植物贡献更大, 与平上段、平中上亚段烃源岩有明显亲缘关系, 并有成熟度较高的低带-西次凹海源有机质的贡献。Ⅱ₂类原油主要分布在武云亭及宝云亭-团结亭地区, 陆源裸子植物松柏目树脂贡献更大, 与平中下亚段和平下段烃源岩具有明显亲缘关系。研究成果对深化平北斜坡带油源的新认识和油气藏预测及勘探部署有较大指导作用。

关键词:地球化学特征; 原油成因类型; 油-源对比; 煤系原油; 平湖组; 平北斜坡带; 西湖凹陷; 东海盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics of crude oil from coal measure source rocks and fine oil-source correlation in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

Li Tianjun^{1,2}, Huang Zhilong^{1,2}, Guo Xiaobo³, Zhao Jing^{1,2}, Jiang Yiming⁴, Tan Sizhe⁴

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200030, China]

Abstract: The properties and distribution of crude oil from the coal measure source rocks are complex in Pingbei slope belt of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. In addition, the sedimentary environment and organic matter origin of coal measure source rocks are highly variable in both vertical and horizontal views. The oil reservoirs in this area are characterized by hydrocarbon supply from multiple sources including western subsag and the slope zone. A combination of geological and geochemical analyses is applied to study crude oil types and fine oil-source correlation. Finally, the relationship between crude oil distribution and hydrocarbon-generating subsag is clarified. The results show that the crude oil in Pingbei area is mainly condensate oil, accompanied by a small amount of light and normal crude oil, and it can be grouped into three types (i. e. Type I, II₁ and II₂) based on biomarker compound features. Type I crude oil mainly sourced from coniferales resinites of gymnosperms of terrestrial higher plants, is mainly distributed in Kongqueting area, and is obviously related to the source rocks in the lower member and lower submember of middle member of Pinghu Formation in the western subsag. Type II₁ crude oil mainly occurs in the upper member and upper submember of middle member of Pinghu Formation in Wuyunting area and the NB8 subsag. It is speculated that both terrestrial gymnosperms and ferns, together with high-maturity marine organic matters from lower slope belt and western

收稿日期:2020-06-18; 修订日期:2022-01-19。

第一作者简介:李天军(1993—),男,博士,油气成藏地质评价。E-mail: litianjun2020@163.com。

通讯作者简介:黄志龙(1962—),男,博士、教授,油气藏形成机理与分布规律。E-mail: huang5288@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05027-002-001)。

sabsag, have made contributions to the generation of Type II₁ crude oil, with the contribution of ferns even greater, and this type of crude oil is obviously related to the source rocks in the upper member and upper submember of middle member of Pinghu Formation. In addition, Type II₂ crude oil is mainly distributed in Wuyunting area and Baoyunting-Tuanjieling area, with greater contributions made by coniferales resinites of terrestrial gymnosperms; and it is obviously related to the source rocks in the lower member and lower submember of middle member of Pinghu Formation. The research results are of guiding value to the new understanding of oil source, reservoir prediction and hydrocarbon exploration in Pingbei slope belt.

Key words: geochemical characteristics, genetic type of crude oil, oil-source correlation, crude oil from coal measure source rock, Pinghu Formation, Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

引用格式:李天军,黄志龙,郭小波,等. 东海盆地西湖凹陷平北斜坡带平湖组煤系原油地球化学特征与油-源精细对比[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 432-444. DOI: 10. 11743/ogg20220215.

Li Tianjun, Huang Zhilong, Guo Xiaobo, et al. Geochemical characteristics of crude oil from coal measure source rocks and fine oil-source correlation in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 432-444. DOI: 10. 11743/ogg20220215.

中国近海盆地油气资源丰富,东海盆地西湖凹陷平北斜坡带历经30余年的勘探,先后在孔雀亭、武云亭、宝云亭和团结亭等构造带发现多个中小型油气田^[1-4]。由于斜坡带烃源岩岩性复杂,高、中、低带源岩演化程度差异大,加之邻近西次凹高熟天然气的充注导致其油气相态及纵、横向分布特征极其复杂。目前,关于斜坡带原油成因、来源及分布特征仍存在较大争议,有关凝析油来源的认识较为统一,认为原油来源于平湖组煤系源岩,煤和暗色泥岩对生油均有贡献,且煤和炭质泥岩占主要贡献^[5-8]。而关于斜坡带原油来源于西次凹还是斜坡次洼,目前存在两种观点:①平北斜坡原油具有远源和近源双向供烃作用,西次凹和平北斜坡原地平湖组源岩均有贡献^[9-10];②西斜坡平湖斜坡带原油大部分为成熟原油,少部分平湖组凝析油为低熟油,均来自于斜坡区平湖组煤系源岩^[6,8]。

关于斜坡带原油性质差异及分布特征的相关认识主要有两种观点:①纵向上不同层段存在凝析油比重的差异,即具有“上油下气”和“上气下油”的特征,主要原因可能是后天次生作用造成的,而不是原始母质类型导致的,“蒸发分馏”和“混合作用”共同控制斜坡带的原油分布^[6,8];②“上油下气”和“上气下油”两种现象的产生主要由源岩性质上的差异和运移作用共同造成^[5,11]。前人的研究成果虽然从油气地球化学角度重点分析了原油成因、来源及次生变化,并在宏观上研究了不同相态原油的分布特征,但均未指出目前油气分布差异的原因,不同类型原油成因、来源以及油-源对比有效指标等。随着斜坡带勘探程度的深化,采集的原油及烃源岩样品也相应增加,这有助于对斜坡带原油来源及成因的深入研究。

据此,本文在前人研究基础上,采集了一些近两年以来新井的原油和烃源岩样品,利用原油物性、饱和烃和芳香烃色谱-质谱和同位素等地球化学资料,全面分析平北斜坡带原油的地球化学特征,并进行原油类型划分,结合煤系烃源岩地球化学特征以及烃源灶分布,明确不同类型原油的成因、来源及分布特征,对该区下一步的油气勘探具有重要意义。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海盆地东北部,是北北东向展布的狭长型新生代沉积凹陷,南北长约440 km,东西宽约110 km,总面积近 5×10^4 km²,蕴藏着丰富的油气资源^[12-13]。西湖凹陷从西到东可划分为西部斜坡带、中央反转构造带和东部断阶带3个一级构造带,其中西部斜坡带自北而南可进一步划分为杭州斜坡带、平湖斜坡带和天台斜坡带3个次级构造单元^[13-15]。本次研究区为平湖斜坡带平北地区,从南到北依次为团结亭、宝云亭、武云亭和孔雀亭等局部构造(图1a)。平湖斜坡带自下而上发育始新统宝石组与平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组与更新统东海群等地层^[4,16]。主要勘探目的层为平湖组,自下而上可划分为平湖组下段(平下段)、平湖组中段下亚段(平中下亚段)、平湖组中段上亚段(平中上亚段)和平湖组上段(平上段)(图1b)。

平北斜坡带以受潮汐影响的三角洲-障壁岛海岸沉积体系为主,平湖组发育海-陆过渡相煤、炭质泥岩和泥岩3类,煤和炭质泥岩有利的沉积环境为潮坪-潟湖体系^[3,4,17-20],具有范围广、厚度大的特征,均已达到

成熟演化阶段(图1c),是斜坡带的主力烃源岩类型^[3,7-8]。平北斜坡带发育多个生烃次洼,于水(2019)^[3]研究表明,斜坡带北部煤层较南部发育,中北部孔雀亭地区(KQT洼)以三角洲前缘次贫氢和潮坪-潟湖次富氢有机相为主,煤和炭质泥岩发育,裸子植物为主要生物来源(生源);而NB8洼为水体较深的潟湖沉积环境,以次富氢有机相为主,煤和炭质泥岩发育,蕨类植物为主要生源;武云亭地区(WYT洼)为潮坪-潟湖过渡区,发育潮坪-潟湖(次)富氢有机相,裸子植物和蕨类植物为主要生源,沉积环境差异决定了烃源岩类型的不同。平湖组煤系烃源岩有机质类型以Ⅱ-Ⅲ型为主,潮坪-潟湖沉积环境的有机质类型偏好,其次为三角洲前缘亚相。生烃显微组分可能为壳质组中的树脂体以及镜质组中的富氢组分,且饱和烃中富含二萜烷类化合物,以海松烷和16 β (H)扁植烷类含量最多,这是煤系油-源对比的重要指标^[6-8,21]。

2 样品采集与实验分析方法

本次研究采集了平北斜坡带孔雀亭、武云亭和宝云亭油气田共20个原油样品,10个烃源岩样品(煤1个,炭质泥岩5个,暗色泥岩4个)。原油样品保存于

5 mL透明玻璃瓶中,瓶盖垫有锡箔纸,并置于-5℃的冰箱中保存,防止挥发与污染。本次重点采用饱和和炔色谱-质谱和碳同位素实验结果进行原油地球化学特征以及油-源、气-源对比工作。饱和炔气相色谱-质谱分析采用配备HP-5MS石英毛管柱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)的美国Agilent 6890GC/5975iMS色谱-质谱分析仪器,进样口温度为300℃,不分流进样,程序升温,载气条件为含量99.999%的氦气,1 mL/min流速;离子化方式为EI,70 eV,数据采集方式为全扫描/多离子(SCAN/SIM)。碳同位素分析采用FLASH HT EA-MAT 253 IRMS同位素质谱分析仪,载气为高纯氦气,流量为100 mL/min,反吹流量为250 mL/min;燃烧气为高纯氧,流量为250 mL/min;执行标准为SY/T 5238—2008《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》。以上所有实验均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 原油物性特征

研究区原油密度为0.752 6~0.875 2 g/cm³,含蜡

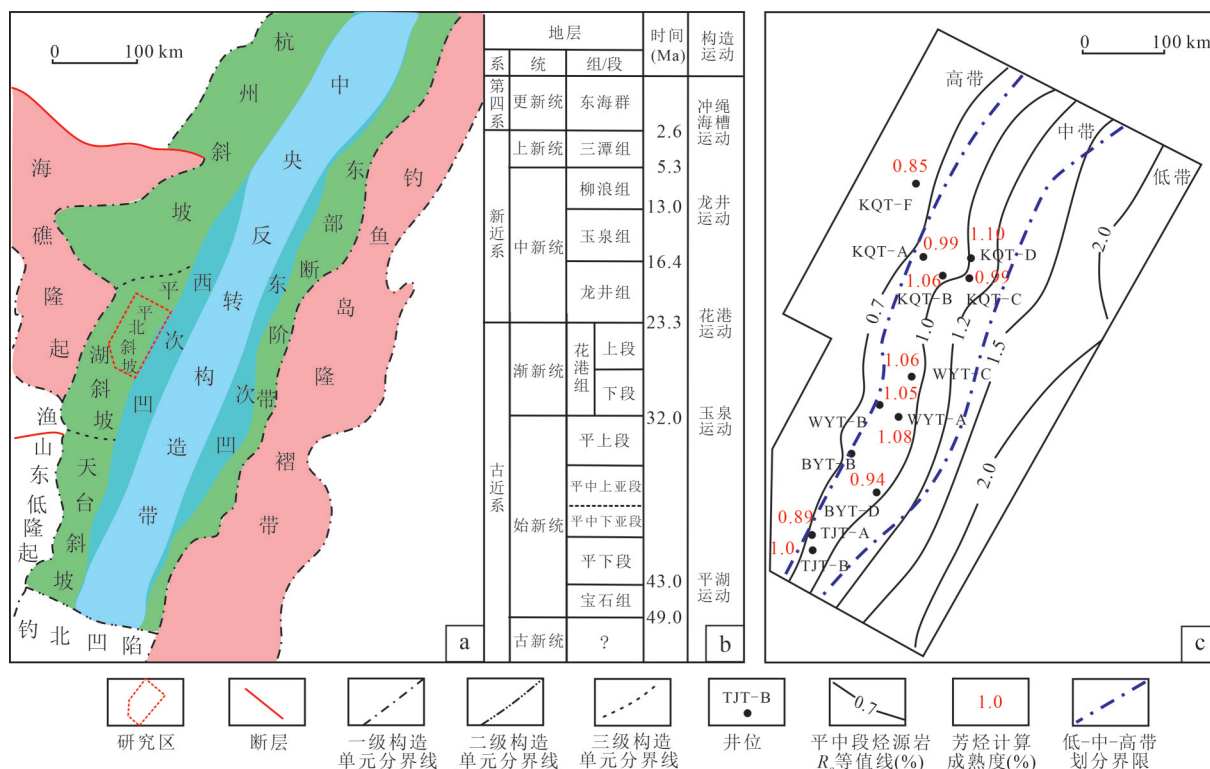


图1 东海陆架盆地西湖凹陷地质概况

Fig. 1 Geological overview of Xihu Sag in the East China Sea Shelf Basin

a. 西湖凹陷构造单元划分(据周心怀等,2019修改);b. 西湖凹陷地层表;c. 平北斜坡带平湖组烃源岩成熟度及低-中-高带划分(据刘金水,2019修改)

量为0.26%~26.81%;原油凝固点为-30~32℃,平均为12℃;50℃时原油粘度为0.82~13.80 mPa·s,平均为4.78 mPa·s;含硫量基本小于0.5%,沥青质含量极低(<0.5%)。根据原油物理性质,平北斜坡带各油气田原油大致可分为3大类:即凝析油、轻质油和正常原油。部分油气层测试结果显示气/油比高达3 000~5 000 m³/m³,且不同类型原油所处的温-压条件有所区别^[9,22]。凝析油和轻质油具有“六低一高”的特征,即低密度、低含蜡量、低粘度、低硫、低凝固点、低沥青质和高轻烃含量的特征,颜色通常显现淡黄-褐红色,一般产于高温、高压油气藏中,如孔雀亭和武云亭地区平中下亚段和平下段的原油,密度小于0.85 g/cm³,含蜡量低于10%,凝固点低于12℃。而正常原油具有密度大、含蜡量高、凝固点高、沥青质高和轻馏分低的特征,颜色通常显现褐-黑褐色,多处于常压或弱超压环境中,如武云亭和宝云亭地区平上段和平中上亚段原油,地层压力系数小于1.2,原油密度大于0.85 g/cm³,含蜡量大于10%,凝固点一般大于15℃。由图2可以看出,不同地区原油密度和含蜡量纵向变化特征有差异,孔雀亭地区原油密度、含蜡量随深度变浅而降低,但趋势不明显;宝云亭和武云亭地区原油密度、含蜡量均随深度变浅而增加,这间接说明了孔雀亭地区原油可能有一定的垂向运移或气侵的特征^[9,22-23],而宝云亭和武云亭地区原油垂向运移不明显。

3.2 原油饱和烃地球化学特征

饱和烃色谱-质谱分析表明,原油中含有丰富的低分子量的二环倍半萜和二萜类化合物,其中二萜类化合物主要包括三环二萜烷和四环二萜烷,前者以降海松烷和异海松烷为主,后者以16 β (H)-扁枝烷和贝

壳杉烷为主,然而五环三萜类的甾烷和藿烷化合物含量较低,反映原油母质主要来自于高等植物^[10,23]。同时,这类含量高的生物标志化合物(倍半萜和二萜类化合物)也是本区原油成因及油源研究的重要特征指标^[8,22],而五环三萜类化合物可作为辅助指标。

在 $m/z=123$ 质量色谱图上(图3),二环倍半萜主要以五甲基四氢化萜、8 β (H)-补身烷和8 β (H)-升补身烷含量最高,一般认为8 β (H)-升补身烷可能来自富含粘土、沉积环境呈氧化性的泥岩或煤系地层^[24-26]。二萜类化合物主要为降异海松烷、异海松烷和16 β (H)-扁枝烷,其分布特征能指示陆源有机质输入差异,均可作为原油成因及来源分析的重要指标^[6]。一般认为(异)海松烷主要源于针叶类裸子植物松柏目树脂,16 β (H)-扁枝烷主要来源于蕨类植物^[3,21,26]。对比分析显示,孔雀亭和武云亭地区的平下段原油主要以异海松烷含量最高,次为降异海松烷和扁枝烷,异海松烷/扁枝烷比值大于5,降异海松烷/异海松烷比值小于0.6,分布特征呈不对称的倒“V”型,五甲基四氢化萜、8 β (H)-补身烷和8 β (H)-升补身烷呈对称的倒“V”型,8 β (H)-补身烷/8 β (H)-升补身烷比值大于1(图3),可能反映陆源高等植物的针叶类裸子植物贡献。武云亭地区平上段和平中上亚段的原油二萜类化合物分布特征与孔雀亭相似,但异海松烷/扁枝烷比值小于5,8 β (H)-补身烷含量明显要低于8 β (H)-升补身烷,可能反映蕨类植物为主的生源(图3)。宝云亭和团结亭地区原油的降异海松烷近似或略高于异海松烷含量,16 β (H)-扁枝烷含量低,整体呈反“厂”型,倍半萜类化合物含量变化较大(图3)。倍半萜和二萜类化合物分布的差异表明不同地区以及同一地区不同层位的原油母质来源可能存在差异。

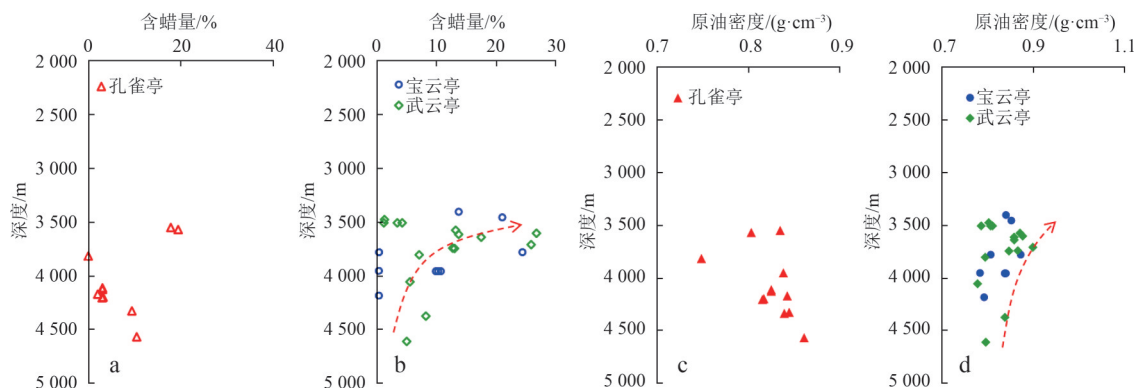


图2 西湖凹陷平北斜坡带平湖组原油密度、含蜡量随深度变化特征

Fig. 2 Crude oil density and wax content vs. depth of the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

- a. 孔雀亭地区原油含蜡量随深度变化; b. 宝云亭、武云亭地区原油含蜡量随深度变化; c. 孔雀亭地区原油密度随深度变化; d. 宝云亭、武云亭地区原油密度随深度变化

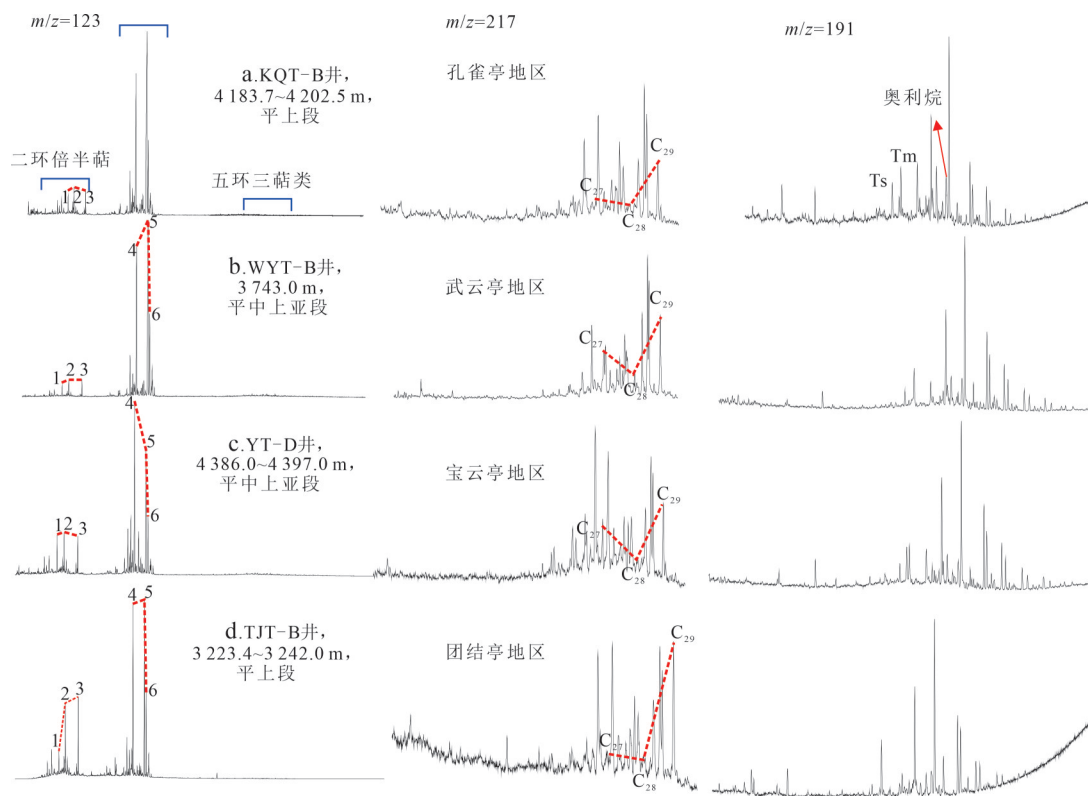


图3 西湖凹陷平北斜坡带平湖组原油生物标志化合物特征

Fig. 3 Biomarker compound characteristics of crude oil in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

1. 4,4,8,8,9-五甲基十氢化萘; 2. $8\beta(\text{H})$ -补身烷; 3. $8\beta(\text{H})$ -升补身烷; 4. $4\beta(\text{H})$ -19降异海松烷; 5. 异海松烷; 6. $16\beta(\text{H})$ -扁枝烷

从 $m/z=217$ 质量色谱图中(图3),大部分原油样品的规则甾烷 C_{27} — C_{28} — C_{29} 呈明显的“L”型,少部分为不对称“V”型, C_{29} 规则甾烷含量占绝对优势,且大部分样品的 C_{29} 重排甾烷明显高于 C_{27} 规则甾烷,甚至部分样品谱峰存在共逸现象,表明研究区大部分原油来自以陆源高等植物为主要生源构成的烃源岩,少部分原油母质具有不等比例的低等水生植物贡献。 $m/z=191$ 质量色谱图中(图3),大部分检测样品以 C_{30} 藿烷和 C_{29} 降藿烷占明显优势,而 C_{31} — C_{35} 高碳数藿烷系列化合物依次降低。同时含有丰富的奥利烷和 C_{29} 三降藿烷(Ts 和 Tm),伽马蜡烷含量较低,奥利烷指数介于 0.12 ~ 0.74,说明原油母质主要为陆源有机质生源;伽马蜡烷指数介于 0.02 ~ 0.12,表明原油母质发育于淡水-微咸水的氧化沉积环境。

3.3 原油成熟度

本文主要应用芳烃参数和饱和烃生物标志化合物成熟度参数综合判别平北斜坡带原油母质的成熟度。基于芳烃组分中的菲系列化合物, M. Radke^[27] 等提出的甲基菲指数(MPI_1)以及由此换算的镜质体反射率($R_o=0.55 \text{ MPI}_1+0.44$)可以反映成熟度。平北地区所

有原油样品的甲基菲指数为 0.62 ~ 1.26, 计算 R_o 为 0.77% ~ 1.16%, 反映原油烃源岩基本处于成熟演化阶段(表1)。此外,甾烷和萘烷类成熟度参数 Ts/Tm , $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ 甾烷 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 分布介于 0.35 ~ 1.03, 0.37 ~ 0.56, 0.42 ~ 0.61, 均反映油源岩总体处于成熟阶段(表1)。

3.4 原油及族组分碳同位素

对于复杂油气成因及油-源对比工作,碳同位素可作为油-源对比的良好指标^[22,28-34]。因此,本文主要应用原油、饱和烃及芳香烃碳同位素综合分析油源。统计分析表明,原油碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)介于 -27.31‰ ~ -25.35‰, 饱和烃碳同位素值介于 -29.22‰ ~ -26.26‰, 芳香烃碳同位素值介于 -28.28‰ ~ -23.49‰。不同地区以及同一地区不同层位的原油和组分碳同位素差异较大(图4a,b), 并与原油物性特征似乎有关联,如孔雀亭地区饱和烃和芳香烃碳同位素较重,芳香烃碳同位素组成基本大于 -25‰, 对应的原油密度和含蜡量较低(<10%), 武云亭和宝云亭地区原油碳同位素组成大部分小于 -26.3‰, 平中上亚段和平上段碳同位素值要略低于

表 1 西湖凹陷平北斜坡带平湖组原油成熟度参数统计

Table 1 Statistics of crude oil maturity parameters of the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

井位	顶深/m	底深/m	$\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 20S/(20S+20R)	C_{29} 甾烷 $\alpha\beta/(\alpha\beta+\alpha\alpha)$	Ts/Tm	MPI_1	MPI_1 计算 R_o /%
KQT-F	2 647.0	—	0.45	0.51	0.36	0.62	0.77
KQT-C	4 548.7	4 566.2	0.52	0.56	0.66	0.71	0.89
KQT-F	3 099.0	—	0.48	0.52	0.50	0.75	0.85
TJT-A	3 223.4	3 242.0	0.54	0.54	0.35	0.82	0.89
TJT-A	2 845.4	2 850.1	0.37	0.45	0.38	0.74	0.85
WYT-B	3 640.5	—	0.44	0.51	0.36	0.97	0.98
KQT-C	4 183.0	4 196.0	0.51	0.58	0.66	0.97	0.99
WYT-B	3 475.0	—	0.39	0.42	0.44	0.98	0.99
WYT-A	4 580.0	4 620.0	0.55	0.52	0.46	1.00	1.00
KQT-B	4 186.7	4 202.5	0.56	0.61	0.64	1.01	1.00
KQT-B	4 107.5	4 125.0	0.54	0.58	0.70	1.02	1.01
WYT-B	3 743.5	—	0.43	0.54	0.49	1.03	1.02
WYT-B	3 546.0	—	0.43	0.50	0.36	1.03	1.02
BYT-D	4 386.5	4 459.5	—	—	—	1.06	1.04
WYT-B	3 532.0	—	0.45	0.50	1.03	1.09	1.05
WYT-B	3 760.0	—	0.45	0.49	0.78	1.09	1.06
WYT-B	3 614.0	—	0.47	0.53	0.46	1.10	1.06
KQT-D	4 317.4	—	0.40	0.54	0.71	1.15	1.09
WYT-A	4 359.0	4 382.0	0.52	0.52	0.36	1.15	1.09
WYT-B	3 780.0	—	0.44	0.49	0.46	1.25	1.15
KQT-F	2 861.9	—	0.44	0.54	0.69	1.26	1.16

注:“—”表示无数据。

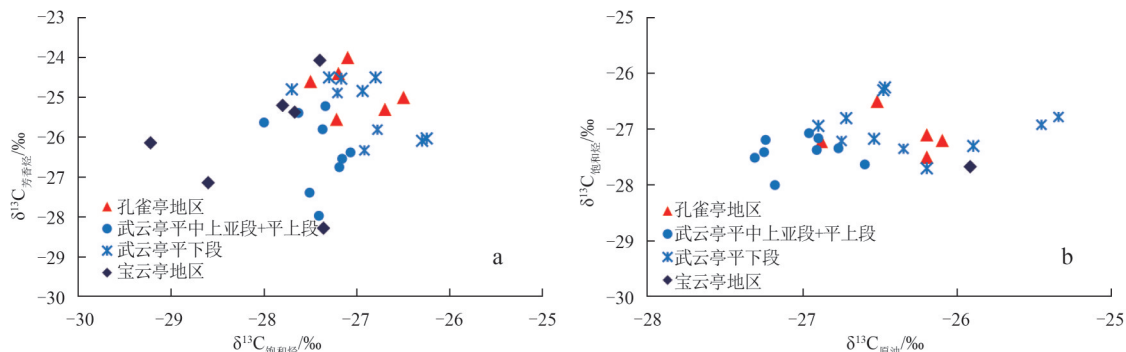


图 4 西湖凹陷平北斜坡带平湖组原油、饱和烃和芳香烃碳同位素组成关系

Fig. 4 Cross plots between crude oil carbon isotopes, saturated hydrocarbon isotopes and aromatic hydrocarbon isotopes in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag
a. 饱和烃和芳香烃碳同位素关系; b. 原油和饱和烃碳同位素关系

平中下亚段和平下段,对应原油密度和含蜡量也较高(>10%)。以上差异反映了平北斜坡带原油具有不同的母质来源,同位素较重的原油,其密度和含蜡量低,可能指示典型煤成油特征,如有暗色泥岩贡献,原油含蜡量会增加,其芳香烃同位素也相对偏轻^[9,35]。

3.5 原油成因类型与分布特征

综合原油物性和生物标志化合物特征,以 $m/z=123$

的倍半萜和二萜类化合物(补身烷系列、海松烷系列)以及五环三萜类(奥利烷、伽马蜡烷)相对含量差异为主要依据,碳同位素作为辅助指标,平北地区平湖组原油可分为3种类型(图5,图6)。

I类原油主要分布在孔雀亭地区和WYT-A井平下段,来自KQT-A, KQT-B, KQT-C和WYT-A井(图7)。色谱-质谱图特征为:(降)异海松烷优势, $16\beta(H)$ -扁枝烷含量较低,二者比值大于5, $8\beta(H)$ -

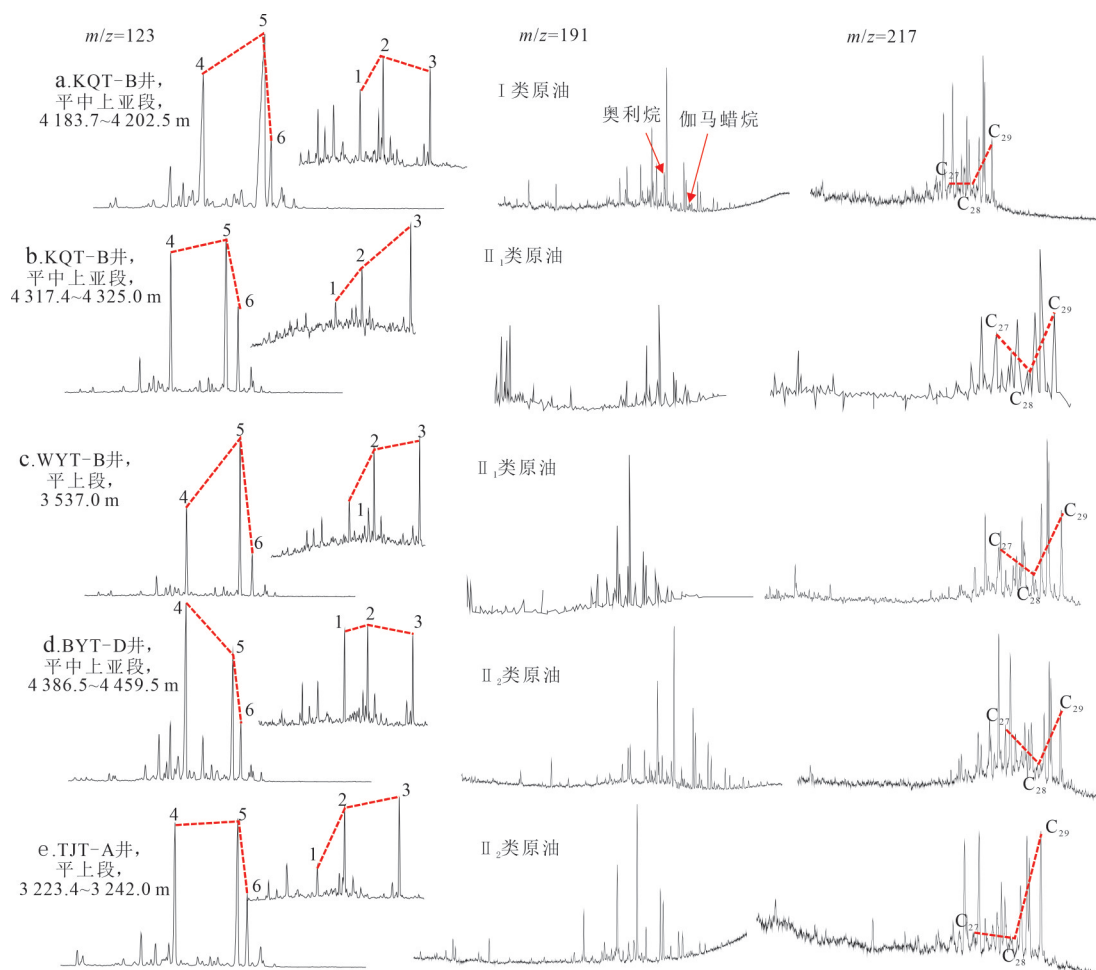


图5 西湖凹陷平北斜坡带平湖组不同类型原油谱图特征

Fig. 5 Mass spectrograms of crude oil of diverse types in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag
1. 4,4,8,8,9-五甲基十氢化萘; 2. $8\beta(\text{H})$ -补身烷; 3. $8\beta(\text{H})$ -升补身烷; 4. $4\beta(\text{H})$ -19降异海松烷; 5. 异海松烷; 6. $16\beta(\text{H})$ -扁枝烷

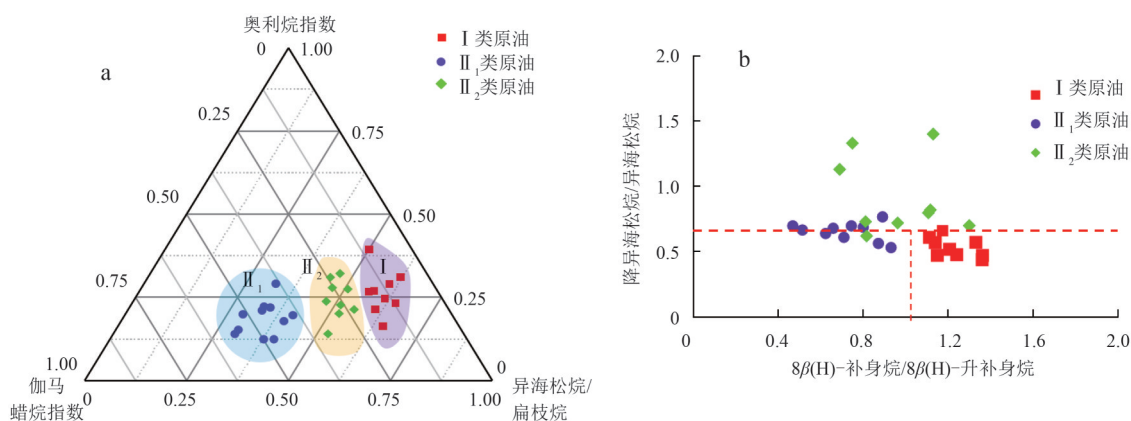


图6 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组原油分类

Fig. 6 Crude oil classification charts of the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag
a. 不同类型原油异海松烷/扁枝烷、奥利烷指数和伽马蜡烷指数三角图; b. 不同类型原油降异海松烷/异海松烷、 $8\beta(\text{H})$ -补身烷/ $8\beta(\text{H})$ -升补身烷交汇图

补身烷 $>8\beta(\text{H})$ -升补身烷, 4,4,8,8,9-五甲基十氢化萘 $<8\beta(\text{H})$ -补身烷, 呈对称的倒“V”型; 奥利烷指

数较高(0.34 ~ 0.73), 低伽马蜡烷含量(伽马蜡烷指数 <0.04), 低于 C_{24} 的三环萜烷含量低; 规则甾烷

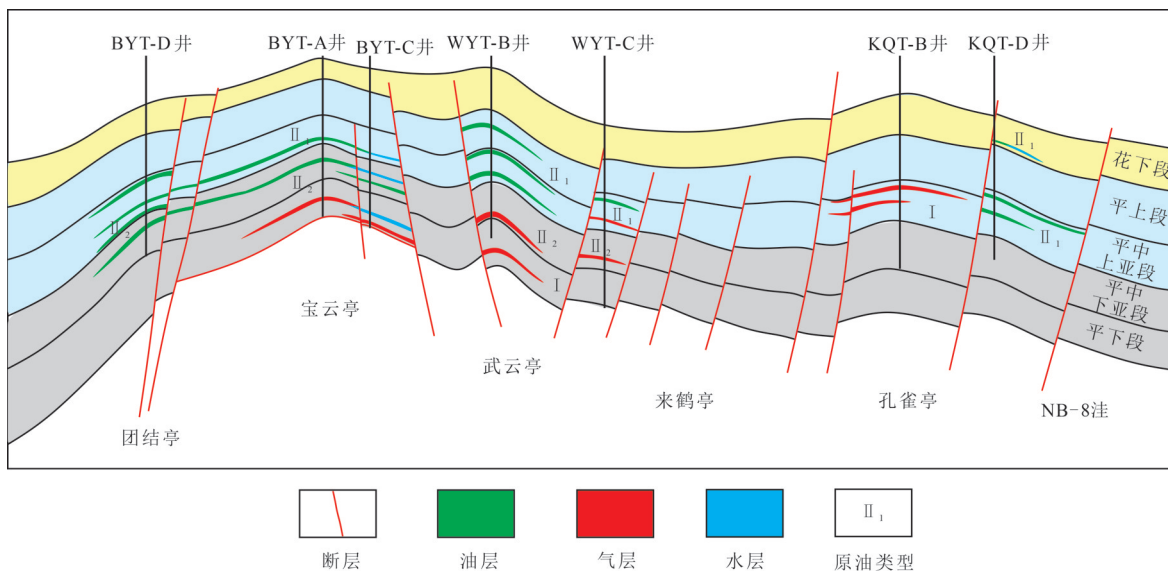


图7 西湖凹陷平北斜坡带平湖组不同类型原油纵向分布特征示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the vertical distribution of different types of crude oil in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

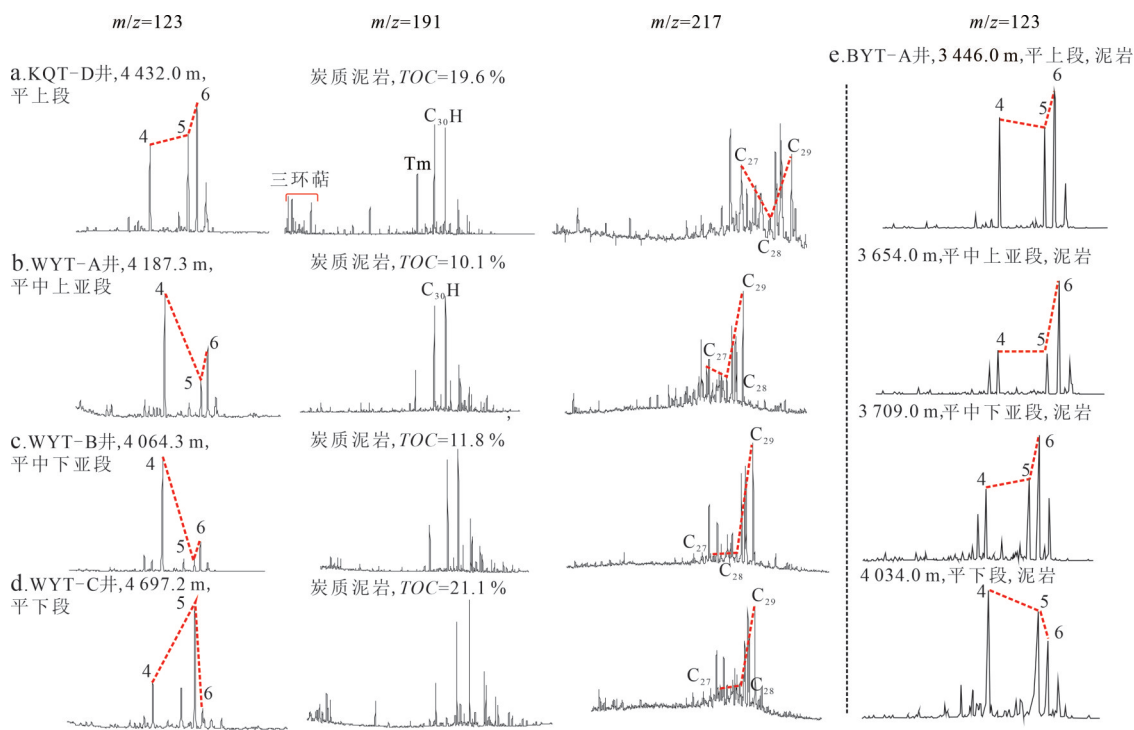


图8 西湖凹陷平北斜坡带平湖组烃源岩抽提物的生物标志化合物特征

Fig. 8 Biomarker compound characteristics of source rock of the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

4. $4\beta(H)$ -19降异海松烷; 5. 异海松烷; 6. $16\beta(H)$ -扁枝烷; Tm. 17α , 22, 29, 30-三降藿烷; $C_{30}H$. $17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -藿烷

$C_{28}<C_{27}<C_{29}$, C_{27} 规则甾烷含量极低, 规则甾烷 C_{27}/C_{29} 比值大部分小于 0.3, 呈反“L”型, 孕甾烷和升孕甾烷含量低(图 8a); 与之对应的原油、饱和烃及芳香烃碳同位素也较重, 原油密度和含蜡量低。推测该类原油来源于煤或炭质泥岩可能性较大, 生油显微组分主要为壳质组和富氢镜质组, 针叶类树脂体可能占主要

贡献^[3,8]。

II₁类原油主要分布于武云亭地区平上段和平中上亚段, 油样来自于 WYT-B 井和 KQT-F 井(图 7)。色谱-质谱图特征为: 异海松烷优势, $16\beta(H)$ -扁枝烷较高, 二者比值均小于 4, 且 $8\beta(H)$ -补身烷 $< 8\beta(H)$ -升补身烷, 3 种典型倍半萜类化合物呈明显的“上升”型;

奥利烷指数中等偏低,介于0.07~0.31,伽马蜡烷含量相对偏高,伽马蜡烷指数一般大于0.05; C_{27} 规则甾烷含量明显较I类原油偏高, $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 呈明显的不对称“V”型,规则甾烷 C_{27}/C_{29} 比值介于0.5~0.9,且孕甾烷和升孕甾烷含量中等偏低(图5);原油对应的密度和含蜡量偏高,饱和烃和芳香烃碳同位素相对偏轻。以上特征可以推测:该类原油可能为煤、炭质泥岩和暗色泥岩混合来源,生源为陆源高等植物的裸子植物和蕨类植物的混合,并有相当程度的低等水生生物的贡献。

Ⅱ₂类原油主要分布在宝云亭和团结亭地区,少部分在武云亭地区平中下亚段和平下段,样品来自WYT-B和WYT-C井平中下亚段和平下段、BYT-D井和TJT-A井(图7)。整体上,其色谱-质谱图特征与Ⅱ₁类原油较为相似,但其变化较大,主要表现为:降异海松烷 $\geq$ 异海松烷, $16\beta(H)$ -扁枝烷含量中等偏高,补身烷系列相对含量变化大,兼具“上升”型和倒“V”型特征;中等奥利烷指数,伽马蜡烷含量变化也较大,伽马蜡烷指数介于0.03~0.08,三环萜烷含量极低;规则甾烷 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 分布形式既有明显的不对称“V”型,又有反“L”型(图5)。以上这种特征反映该类原油可能介于I类和Ⅱ₁类之间,其生源也具有陆源高等植物和低等水生生物混合来源特征,但贡献比例变化较大。

上述3种类型的原油,在异海松烷/ $16\beta(H)$ -扁枝烷、奥利烷指数和伽马蜡烷指数三角图中可以明显被区分开(图6a)。降异海松烷/异海松烷、 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷交汇图中,多数Ⅱ₂类原油具有较高的降异海松烷/异海松烷比值而区别于其他类型,I类原油以较高的 $8\beta(H)$ -补身烷/ $8\beta(H)$ -升补身烷比值区别于Ⅱ₁类原油(图6b),该图版的区分效果不及上述三角图版。

3.6 烃源岩地球化学特征

选择主要受生源与沉积环境影响的生物标志物参数,对比分析了平湖组不同层段、不同岩性烃源岩的生物标志物组成特征,如孔雀亭和武云亭地区炭质泥岩生物标志化合物对比分析表明,不同层段、相同岩性的烃源岩其生物标志化合物特征有较大差异(图8)。总体上,平上段及平中上亚段炭质泥岩具有 $16\beta(H)$ -扁枝烷优势,反映蕨类植物和针叶类裸子植物的混合生源,且蕨类植物贡献稍大;规则甾烷 C_{27}/C_{29} 值、伽马蜡烷指数以及三环萜烷含量偏高,指示有一定程度低等水生植物的贡献。而平中下亚段及平下段具有(降)异海松烷高、规则甾烷 C_{27}/C_{29} 值低、伽马蜡烷指数及三环

萜烷含量偏低的特征,反映陆源高等植物的针叶类裸子植物松柏目树脂为主要生源(图8)。此外,宝云亭地区BYT-A井不同深度的4个泥岩样品生物标志化合物参数在纵向上也有相似的规律,即平上段-平中段烃源岩以 $16\beta(H)$ -扁枝烷占优势,异海松烷/ $16\beta(H)$ -扁枝烷比值小于1.5,平下段以(降)异海松烷占优势, $4\beta(H)$ -19降异海松烷 $>$ 异海松烷 $>16\beta(H)$ -扁枝烷。并且在成熟度相近条件下,泥岩的 $16\beta(H)$ -扁枝烷优势更明显,煤和炭质泥岩(降)异海松烷优势更明显。

4 油源与成因探讨

平北地区平湖组以凝析气藏为主,含少量轻质油藏和正常油藏。按照气侵或蒸发分馏原理,垂向上原油分布应该是低蜡、低密度,“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^[6,35]。但实际是,平北地区平湖组上部及中、高带具有典型的高密度、高粘度、高凝固点、高含蜡及高芳香烃特征,与蒸发分馏作用的原油物性趋势相反(图2)。此外,地层压力远大于饱和压力,油藏压力远未达到饱和,不存在强气侵蒸发分馏的特征,整体经历较少或者未发生过气侵作用^[2,9]。因此,仍然保存了早期生成原油的特征,这有助于综合生物标志化合物和碳同位素组成特征进行油-源精细对比。

如图所示(图5,图8,图9),平上段及平中上亚段煤系烃源岩具有明显的扁枝烷优势,饱和烃和芳香烃碳同位素偏轻,Ⅱ₁类原油也具有相似的特征,这类原油主要分布在平上段及平中上亚段,在交汇图中与平上段-平中上亚段烃源岩在同一区域(图9a,b),反映两者具有良好的亲缘关系。分布在孔雀亭地区的I类原油和武云亭、宝云亭—团结亭地区的Ⅱ₂类原油与平下段及平中下亚段烃源岩有亲缘关系,具有明显的(降)异海松烷优势,饱和烃和芳香烃碳同位素偏重, C_{27} 甾烷含量极低,以氧化环境的陆源有机质贡献为主,生油组分主要为针叶类的裸子植物树脂体(图5,图8,图9a,图9b)。这种油-源关系与平中段区域性盖层分隔上含油气系统而导致的原油以短距离运聚成藏为主,且油气藏类型主要为自生自储或近源的岩性油气藏的认识相一致^[3,35]。不同类型原油在平面分布也有一定规律,I类原油主要在孔雀亭地区,Ⅱ₁类原油分散分布于靠近NB8洼的KQT-D井和武云亭—宝云亭地区平上段及平中上亚段,Ⅱ₂类原油集中出现在武云亭—宝云亭

地区的平下段和平中下亚段及团结亭地区(图7)。

前述研究已表明,平北斜坡带原油芳烃组分的甲基菲指数计算的原油成熟度 R_o 分布在0.8%~1.2%,中、低带烃源岩 R_o 介于0.7%~1.0%,基本达到成熟阶段^[2,35]。在平面上,处于高带的TJT-A井和KQT-F井平湖组原油成熟度最低,向中、低带成熟度增高,且平北地区大部分原油样品的计算成熟度与斜坡带的平湖组烃源岩成熟度接近,仅在武云亭地区的平上段原油成熟度略高于本地具有亲缘关系的平中上亚段最大埋深的烃源岩成熟度(图1c,图10a)。因此,平北斜坡带平湖组原油以斜坡带本地的次洼来源为主,少部分原油有低带-西次凹成熟度较高的源岩贡献。

前人研究表明,西湖凹陷平湖斜坡带的中、低带烃源岩以潮坪-潟湖沉积体系为主,煤和炭质泥岩发育,整体处于成熟阶段,裸子植物和蕨类植物为主要生源,且由中带向低带具有蕨类植物贡献增加的趋势^[21]。西次凹以浅海相为主,煤层不发育,藻类等低等水生生物为主要生源,整体处于成熟-高成熟阶段^[2,3]。在纵

向上,孔雀亭地区原油计算 R_o 数据点落在本地烃源岩 R_o 趋势线附近,说明原油并未经过长距离运移,而是就近聚集成藏的(图10a),这与生物标志化合物和碳同位素对比结果一致。因此,孔雀亭地区I类原油主要来自本地孔雀亭地区的平中下亚段-平下段成熟的煤系烃源岩。然而,该区的KQT-D井原油为II₁型,成熟度也偏高($R_o=1.1\%$),明显区别于本地烃源岩生成的原油。而毗邻的NB8洼烃源岩埋藏深,成熟度高;于水(2019)^[3]研究认为该次洼有弱还原-还原的沉积环境,烃源岩生物碎屑来源主要为蕨类植物,恰好与II₁类原油母质相似。因此,KQT-D井原油可能来源于NB8洼(图10a)。

前述研究表明,武云亭地区II₁类原油主要来源于平上段及平中上亚段烃源岩,从成熟度对比来看,该类原油母质 R_o 在1.0%~1.1%,普遍高于本地烃源岩实测值,按 R_o -深度的趋势线, R_o 为1.0%时,地层埋深达4900m(图10b),已高于本地平湖组最大埋深(4500m左右),推测其有低带-西次凹相似类型烃源岩的生烃

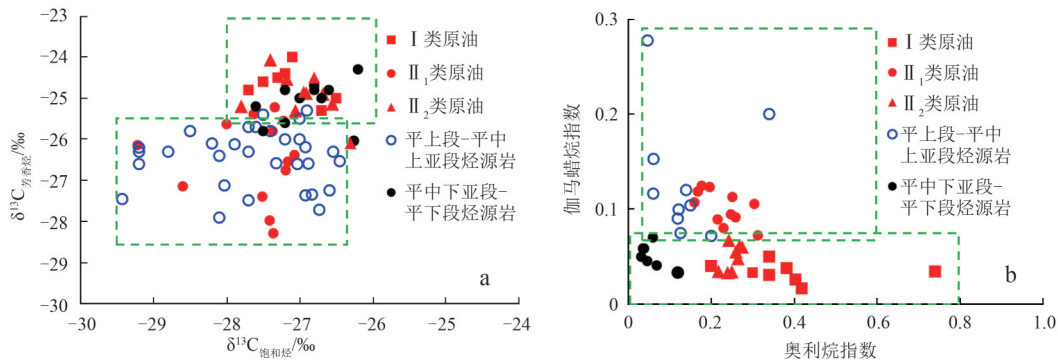


图9 西湖凹陷平北斜坡带平湖组烃源岩与原油地球化学参数对比

Fig. 9 Correlations of source rocks and geochemical parameters of crude oil in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

a. 油-岩饱和烃与芳香烃碳同位素组成关系; b. 油-岩奥利烷指数与伽马蜡烷指数关系

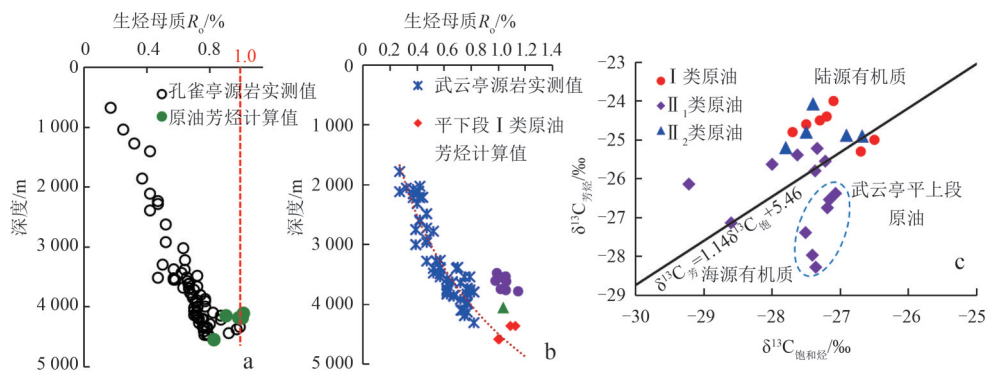


图10 西湖凹陷平北斜坡带平湖组烃源岩、原油母质成熟度参数(R_o)随深度变化关系及其母质来源

Fig. 10 Maturity parameters (R_o) of source rocks vs. depth and source of organic matters in

the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag

a. 孔雀亭地区原油芳烃计算 R_o 与烃源岩 R_o 关系; b. 武云亭地区原油芳烃计算 R_o 与烃源岩 R_o 关系; c. 不同类型原油饱和烃和芳香烃同位素值交汇图

贡献。Sofer(1984)^[36]依据大量分析数据统计分析认为,饱和烃和芳烃组分的碳同位素组成可区分海源与陆源有机质,并统计回归出两者的分界线,建立了解释图版。在此图版中,研究区部分的Ⅱ₁类原油位于海相生烃母质区域(图10c),可见Ⅱ₁类原油受低带-西次凹原油贡献更大。此外,武云亭地区平上段及平中上亚段发育伸入低带-西次凹的北西-南东方向的三角洲前缘砂体,且砂体展布范围广,有利于低带-西次凹烃源岩生成的油气沿砂体侧向运移至斜坡带成藏^[4]。因此,造成武云亭地区不同类型原油纵、横向分布规律的复杂性。

宝云亭和团结亭地区的Ⅱ₂类原油主要来自平中下亚段-平下段烃源岩,中、低带成熟煤系烃源岩贡献占主体。BYT-D井原油母质 R_o 在烃源岩实测 R_o 演化趋势线上,因此本地烃源岩和原油成熟度相匹配(图1c)。团结亭地区Ⅱ₂类原油来自平中下亚段-平下段,TJT-A和TJT-B井原油母质 R_o 分别为0.89%和1.0%,其 R_o 变化率高于该区平中上亚段的烃源岩成熟度。但该井区毗邻平湖大断裂,其下降盘埋深普遍大,平湖组下段烃源岩完全可以达到较高的成熟度(图1c)。该区紧邻平湖沉积大断裂,同沉积断裂活动强烈,来自北西-南东向的三角洲砂体直接入海,导致砂体展布范围小、连续差^[4,37],西次凹烃源岩原油难以运移至该区成藏。因此,宝云亭和团结亭地区原油主要来自于斜坡带的中、低带成熟烃源岩。

5 结论

1) 研究区原油主要为凝析油、少量轻质油和正常原油,均处于成熟阶段,原油母质主要来自于高等植物,可划分为3种类型原油(Ⅰ类、Ⅱ₁类和Ⅱ₂类)。

2) 平北斜坡带平湖组煤系烃源岩以陆源高等植物为主要生源,平上段及平中上亚段烃源岩为蕨类植物和针叶类裸子植物的混合生源,且蕨类植物贡献稍大,并有一定程度低等水生植物的贡献;平中下亚段及平下段烃源岩以陆源高等植物的针叶类裸子植物松柏目树脂为主要生源。相同成熟度下,泥岩的 $16\beta(H)$ -扁枝烷优势更明显,煤和炭质泥岩(降)异海松烷优势更明显。

3) 原油主要来源于煤和炭质泥岩,为典型的陆源有机质贡献原油,少部分低等水生生物贡献。Ⅰ类原油主要分布在孔雀亭地区,与KOT洼的平中下亚段-平下段烃源岩具有明显亲缘关系。Ⅱ₁类原油主要分布在武云亭地区(WYT洼)的平上段和平中上亚段及

NB8洼地区,与平上段-平中上亚段烃源岩有明显亲缘关系,并有相当程度成熟度较高的低带-西次凹海源有机质的贡献。Ⅱ₂类原油主要分布在武云亭地区平中下亚段及宝云亭-团结亭地区,与平中下亚段-平下段烃源岩具有亲缘关系。

致谢:感谢中海石油(中国)上海分公司提供基础资料,以及领导与专家的指导。感谢中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] 薛永安,王奇,牛成民,等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.
Xue Yong'an, Wang Qi, Niu Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [2] 刘金水,赵洪. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带差异性气侵的成藏模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 487-496.
Liu Jinshui, Zhao Hong. Characteristics of differential gas invasion on Pinghu slope of Xihu sag, east China Sea Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(4): 487-496.
- [3] 于水. 西湖凹陷西斜坡平湖组烃源岩沉积成因分析[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1722-1736.
Yu Shui. Depositional genesis analysis of source rock in Pinghu Formation of Western Slope, Xihu Depression[J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1722-1736.
- [4] 周心怀,高顺莉,高伟中,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 153-164.
Zhou Xinhui, Gao Shunli, Gao Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 153-164.
- [5] 李贤庆,钟宁宁,王铁冠,等. 东海盆地西湖凹陷下第三系烃源岩显微组分组成和成烃组分剖析[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(1): 19-25.
Li Xianqing, Zhong Ningning, Wang Tieguan, et al. The study on maceral composition and hydrocarbon-generating macerals of Lower Tertiary source rocks in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(1): 19-25.
- [6] 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): 23-30.

- Fu Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu Sag of China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1994, 8(1): 21-28.
- [7] 朱扬明,周洁,顾圣啸,等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 32-39.
- Zhu Yangming, Zhou Jie, Gu Shengxiao, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 32-39.
- [8] 苏奥,陈红汉. 东海盆地西湖凹陷原油地球化学特征及原油成因来源[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(6): 1072-1082.
- Su Ao, Chen Honghan. Geochemical characteristics of oil and source rock, origin and genesis of oil in Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2015, 40(6): 1072-1082.
- [9] 单超,叶加仁,曹强,等. 西湖凹陷孔雀亭气田成藏主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 135-144.
- Shan Chao, Ye Jiaren, Cao Qiang, et al. Controlling factors for gas accumulation in Kongqueting Gas Field of Xihu Sag[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 135-144.
- [10] 殷世艳,叶加仁,雷闯,等. 西湖凹陷平北地区平湖组原油地球化学特征[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(5): 542-546.
- Yin Shiyan, Ye Jiaren, Lei Chuang, et al. Geochemical characteristics of Pinghu crude oils in Pingbei Area of Xihu Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(5): 542-546.
- [11] 贾健谊,须雪豪,孙伯强. 东海西湖凹陷原油与天然气的地球化学特征[J]. *海洋石油*, 2000, 27(2): 1-7.
- Jia Jianyi, Xu Xuehao, Sun Boqiang. Oil/gas geochemical character in the Xihu Trough of the East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2000, 27(2): 1-7.
- [12] 张国华. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(2): 1-8.
- Zhang Guohua. Origin Mechanism of high formation pressure and its influence on hydrocarbon accumulation in Xihu Sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(2): 1-8.
- [13] 高伟中,孙鹏,田超,等. 东海盆地西湖凹陷地应力场与油气运移关系探讨[J]. *油气藏评价与开发*, 2015, 5(1): 1-6.
- Gao Weizhong, Sun Peng, Tian Chao, et al. Relation between crustal stress field and hydrocarbon migration in west Lake Sag, East China Sea Basin[J]. *Reservoir Evaluation And Development*, 2015, 5(1): 1-6.
- [14] 陈哲,张昌民,侯国伟,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组断层组合样式及其控砂机制[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 824-837.
- Chen Zhe, Zhang Changmin, Hou Guowei, et al. Fault distribution patterns and their control on sand bodies in Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 824-837.
- [15] 徐陈杰,叶加仁,刘金水,等. 东海西湖凹陷平湖组Ⅲ型干酪根暗色泥岩生排烃模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 359-366.
- Xu Chenjie, Ye Jiaren, Liu Jinshui, et al. Simulation of hydrocarbon generation and expulsion for the dark mudstone with Type-Ⅲ kerogen in the Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 824-837.
- [16] 叶加仁,陈海红,陈景阳,等. 东海西湖凹陷成藏流体历史分析[J]. *天然气工业*, 2006, 26(9): 40-43, 163-164.
- Ye Jiaren, Chen Haihong, Chen Jingyang, et al. Fluid history analysis in the Xihu Depression, East China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 40-43, 163-164.
- [17] 熊斌辉,王春红,张锦伟,等. 西湖凹陷古近系平湖组煤层分布及油气意义[J]. *海洋石油*, 2007, 27(3): 27-33.
- Xiong Binhui, Wang Chunhong, Zhang Jinwei, et al. The distribution and exploration implications of coal beds of Pinghu Formation, Paleogene in Xihu Sag[J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(3): 27-33.
- [18] 杨彩虹,高兆红,蒋一鸣,等. 西湖凹陷平湖斜坡始新统平湖组碎屑沉积体系再认识[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(9): 11-14.
- Yang Caihong, Gao Zhaozhong, Jiang Yiming, et al. Reunderstanding of clastic rock sedimentary facies of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope of Xihu Sag[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(9): 11-14.
- [19] 沈玉林,秦勇,郭英海,等. 基于米氏聚煤旋回划分的西湖凹陷平湖组煤系烃源岩发育特征[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 706-714.
- Shen Yulin, Qin Yong, Guo Yinghai, et al. Development characteristics of coal-measure source rocks divided on the basis of Milankovich coal accumulation cycle in Pinghu Formation, Xihu Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 706-714.
- [20] 田杨,叶加仁,雷闯,等. 断陷盆地海陆过渡相烃源岩发育模式:以西湖凹陷平湖组为例[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 898-908.
- Tian Yang, Ye Jiaren, Lei Leichuang, et al. Development model for source rock of marine-continental transitional facies in faulted basins: A case study of Pinghu Formation in Xihu Sag[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 898-908.
- [21] 刁慧,刘金水,侯读杰,等. 中国近海断一拗转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 102-114.

- Diao Hui, Liu Jinshui, Hou Dujie, et al. Coal-bearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China-A case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39 (6): 102-114.
- [22] 苏奥,陈红汉,马玉华,等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭气区气侵条件及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 292-300.
- Su Ao, Chen Honghan, Ma Yuhua, et al. Geologic conditions and main controlling factors of gas washing in Kongqueting region in Xihu Depression, Eastern Sea Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 292-300.
- [23] 曹倩,宋在超,周小进,等. 东海盆地西湖凹陷原油地化特征及来源分析[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 251-259.
- Cao Qian, Song Zaichao, Zhou Xiaojin, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 251-259.
- [24] 文志刚,唐友军,余秋华. 苏丹 Muglad 盆地六区块原油的地球化学特征[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(4): 66-70.
- Wen Zhigang, Tang Youjun, Yu Qiuhua. Crude oil geochemical characteristics of Block 6 in Sudan Muglad Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(4): 66-70.
- [25] 许婷,侯读杰,曹冰. 东海盆地西湖凹陷凝析油和轻质油生源母质剖析[J]. *地球化学*, 2015, 44(3): 289-300.
- Xu Ting, Hou Dujie, Cao Bing. Study of precursors for condensates and light oils in Xihu Sag of East China Sea Basin [J]. *Geochimica*, 2015, 44(3): 289-300.
- [26] 侯读杰,王培荣,林壬子,等. 黄县褐煤中二萜类的分布和热演化特征[J]. *石油学报*, 1992, 13(3): 27-35.
- Hou Dujie, Wang Peirong, Lin Renzi, et al. Distributon of some diterperenoid hydrocarbons in Huangxian brown coal and their thermal evolution [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1992, 13(3): 27-35.
- [27] Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 5(3): 224-236.
- [28] 刘宝泉,蔡冰,李恋,等. 冀中地区凝析油、轻质油油源的判别[J]. *石油勘探与开发*, 1990, (1): 22-31.
- Liu Baoquan, Cai Bing, Li Lian, et al. Identification of the source of the condensate and volatile oil in Jizhong Region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1990, (1): 22-31.
- [29] 王香增,任来义,张丽霞,等. 鄂尔多斯盆地吴起一定边地区延长组下组合油源对比研究[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(4): 426-431.
- Wang Xiangzeng, Ren Laiyi, Zhang Lixia, et al. Oil and source rock correlation of lower assemblage of Yanchang Formation in Wuqi and Dingbian areas, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(4): 426-431.
- [30] 陈治军,马芳侠,肖刚,等. 银额盆地哈日凹陷巴音戈壁组精细油源对比[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 900-916.
- Chen Zhijun, Ma Fangxia, Xiao Gang, et al. Oil-sources rock correlation of Bayingebi Formation in Hari sag, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 900-916.
- [31] 万友利,王剑,付修根,等. 羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 189-200.
- Wan Youli, Wang Jian, Fu Xiugen, et al. Geochemical tracing of isotopic fluid of dolomite reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern depression of Qiangtang Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 189-200.
- [32] 陈波,张顺存,孙国强,等. 准噶尔盆地车拐斜坡区储层碳酸盐胶结物碳氧同位素特征及其成因[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(4): 101-106.
- Chen Bo, Zhang Shuncun, Sun Guoqiang, et al. Characteristics and formation mechanism of Carbonate cementation in Che-Guai slope area, Junggar Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(4): 101-106.
- [33] 万涛,张洪安,张宝君,等. C29重排谷甾烷在油源对比研究中的应用——以银额盆地查干凹陷为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2): 173-178.
- Wan Tao, Zhang Hongan, Zhang Baojun, et al. The application of C29 rearranged sitostane in oil source correlation research: taking Chagan Depression of Yingen-Ejinaqi Basin for example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(2): 173-178.
- [34] Ramkumar M, Nagarajan R, Santosh M. Advances in sediment geochemistry and chemostratigraphy for reservoir characterization [J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(4): 308-326.
- [35] 苏奥,陈红汉,王存武,等. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 521-527.
- Su Ao, Chen Honghan, Wang Cunwu, et al. Genesis and maturity identification of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 521-527.
- [36] Zvi S. Stable carbon isotope compositions of crude oils: Application to source depositional environments and petroleum alteration [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(1): 31-49.
- [37] 蒋一鸣,邵龙义,李帅,等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究[J]. *现代地质*, 2020, 34(1): 141-153.
- Jiang Yiming, Shao Longyi, Li Shuai, et al. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu tectonic belt, Xihu Sag [J]. *Geoscience*, 2020, 34(1): 141-153.

(编辑 张玉银)