

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 上古生界原油成因及勘探前景

赵永强^{1,2,3}, 许锦^{1,2,3}, 倪春华^{1,2}, 张毅^{1,2,3}, 马中良^{1,2,3},
王付斌⁴, 贾会冲⁵, 张威⁵, 齐荣⁵, 安川⁵

1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126;

4. 中国石化华北油气分公司 油气勘探管理部, 郑州 450006;

5. 中国石化华北油气分公司 勘探开发研究院, 郑州 450006

摘要:鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界海陆过渡相有一套良好的生储盖组合, 目前已发现了东胜大气田。该区二叠系下石盒子组产出少量中质原油, 但原油的成因及其勘探前景尚不明确。基于对该区原油的物性、饱和烃色谱、生物标志物及碳同位素等地化特征的研究, 试图揭示原油的成因和勘探前景。杭锦旗地区上古生界原油具有低硫、高蜡、中等成熟度特征, 其甾烷分布显示以陆生植物为主, 少量水生生物; Pr/Ph 值为 2.16~2.26, 重排甾烷和重排藿烷含量高, 伽马蜡烷含量低, 原油碳同位素值为 $-27.7‰$ ~ $-26.8‰$, 正构烷烃单体烃碳同位素前重后轻, 这些特征均指示该原油是由沉积环境为弱氧化的陆相煤系地层中的暗色泥岩生成。二叠系山西组烃源岩有机岩石学、生烃热模拟实验及岩石热解等综合分析表明, 该区山西组暗色泥岩具有一定生油潜力。结合原油产出井的位置和烃源岩的空间展布, 山西组暗色泥岩可能是潜在的烃源岩。杭锦旗地区上古生界良好的生储盖组合条件暗示着该区的原油勘探值得重视, 泊尔江海子断裂两侧邻区是原油聚集的潜在有利区。

关键词: 原油成因; 暗色泥岩; 油气勘探前景; 上古生界; 杭锦旗地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

Origin and exploration prospect of Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

ZHAO Yongqiang^{1,2,3}, XU Jin^{1,2,3}, NI Chunhua^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2,3}, MA Zhongliang^{1,2,3},

WANG Fubin⁴, JIA Huichong⁵, ZHANG Wei⁵, QI Rong⁵, AN Chuan⁵

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

4. Department of Oil and Gas Exploration Management, SINOPEC North China Branch, Zhengzhou, Henan 450006, China;

5. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC North China Branch, Zhengzhou, Henan 450006, China

Abstract: A set of favorable source-reservoir-caprock assemblage was found in the Upper Paleozoic transitional facies in the Hangjinqi area of the Ordos Basin, and the large-scale Dongsheng gas field has been discovered. A small amount of crude oil has been produced from the Lower Shihezi Formation reservoir in the area; however, the origin and exploration prospect of the oil are unclear. Based on the studies including physical property, *n*-alkanes distributions, biomarker compositions, and carbon isotopic ratios, the origin and exploration prospect of the crude oil has been discussed. Results indicate that the Upper Paleozoic crude oil from the Hangjinqi area is mature oil with a low sulfur content and a high wax content, and the steranes are dominated by terrestrial plants and assisted by a small amount of aquatic organism. The Pr/Ph ratio is 2.16–2.26, and the diasteranes and rearranged hopanes are in high contents with a relative low content of gammacerane. The carbon isotopic ratios of the oil range from $-27.7‰$ to $-26.8‰$, and the carbon isotopic compositions of individual *n*-alkanes are heavy

收稿日期: 2022-01-23; 修订日期: 2022-04-29。

作者简介: 赵永强 (1973—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气成藏研究。E-mail: zhaoyq.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05002-006) 资助。

at first and then become light with the increasing of carbon numbers. These characteristics suggest that the oil was generated by the dark mudstone in terrigenous coal measures under weak oxidation environment. The comprehensive analysis combining organic petrography, hydrocarbon generation simulation, and pyrolysis of source rocks in the Shanxi Formation indicates that, the dark mudstone in the Permian Shanxi Formation in the Hangjinqi area displays a certain amount of oil generation potential. In combination with the location of oil producing wells and the spatial distribution of source rocks, the dark mudstone in the Shanxi Formation might be the potential source rocks for the produced oil. The oil exploration of the Upper Paleozoic strata in the Hangjinqi area deserves attention as suggested by the favorable conditions of source-reservoir-caprock assemblage, and the adjacent areas of the Borjiangaizi fault are potential favorable areas for oil accumulation.

Key words: origin of crude oil; dark mudstone; hydrocarbon exploration potential; Upper Paleozoic; Hangjinqi area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国目前年产气量最大的盆地,尤其是盆地中北部地区已成为我国天然气勘探开发的主战场之一。近 5 年来,鄂尔多斯盆地年产气量均在 $400\times 10^8\text{ m}^3$ 以上,2019 年年产气量已超过 $500\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1-2]。鄂尔多斯盆地北缘(简称鄂北)杭锦旗地区上古生界具有良好的生储盖组合,近年来已成为该盆地天然气增储上产的重要领域之一^[3]。早在 1980 年代,就有报道称在鄂北乌兰格地区白垩系露头中发现轻质油,分析认为这些油苗来自二叠系烃源岩^[4]。近年来,鄂尔多斯盆地上古生界找到零星凝析油显示^[5],杭锦旗地区也有液态烃包裹体发现,但未发现液态烃的规模性聚集。近期勘探首次在杭锦旗地区发现二叠系下石盒子组储层中产出轻质原油,表明该区上古生界

经历了原油的生成、充注和成藏,引起了业内对传统产气盆地产油前景的关注。目前尚未见到有关该区原油成因类型、来源的分析,二叠系烃源岩的生油潜力尚不明确,原油勘探前景不明朗。因此,本文拟通过对杭锦旗地区上古生界典型原油的地球化学分析,结合该区烃源岩发育特征,对原油的成因类型和勘探前景进行探讨。

1 区域地质概况

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北缘,处于伊盟隆起、伊陕斜坡和天环坳陷 3 个构造单元的结合部,主要表现为从南部盆内斜坡区向盆缘隆起区过渡的构造特征。区内发育泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井 3 条断裂组成的近东西向断裂带^[6](图 1)。杭

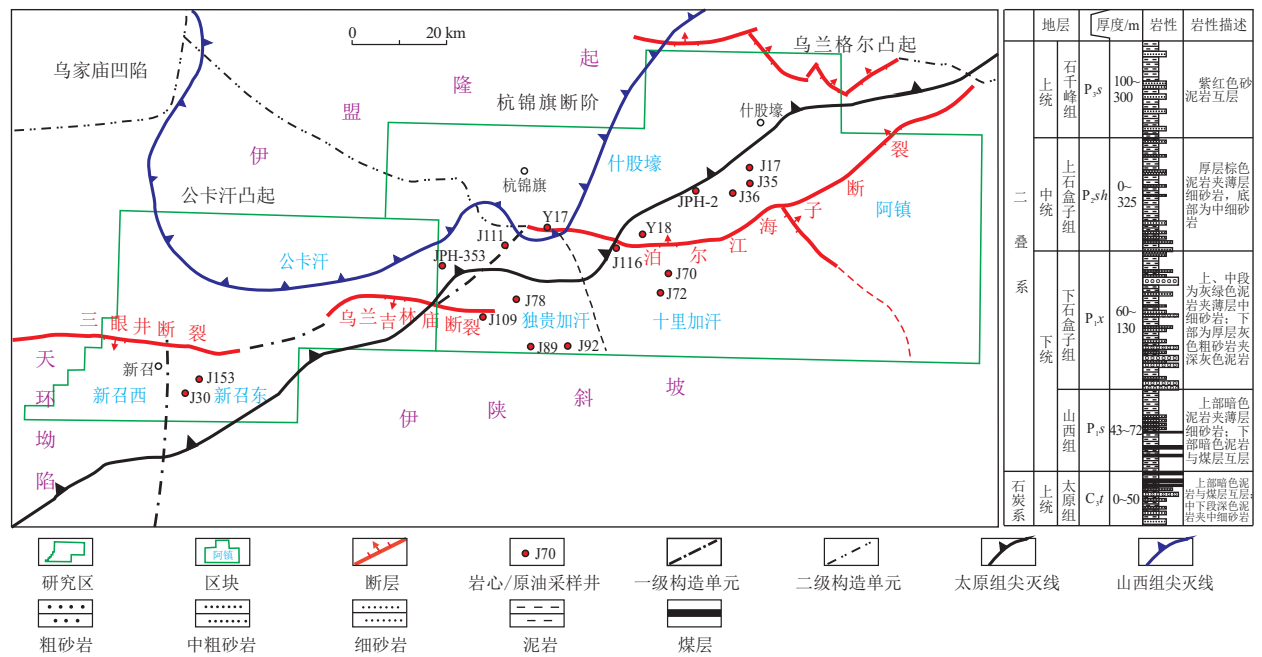


图 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区构造区划及典型井分布(a)和地层柱状图(b)
据倪春华等^[3]和纪文明等^[7]修改。

Fig.1 Distribution of structural zones and typical wells (a) and stratigraphic column (b) in Hangjinqi area, Ordos Basin

锦旗地区是鄂尔多斯盆地北部地区长期继承性古隆起,被认为是油气运移的有利指向区^[3]。

杭锦旗地区上古生界自下而上发育太原组(C_3t)、山西组(P_1s)、下石盒子组(P_{1x})、上石盒子组(P_{2sh})和石千峰组(P_3s)^[2-3],主力烃源岩为太原组和山西组的煤岩、碳质泥岩和暗色泥岩在内的煤系地层(图 1)。上古生界烃源岩分布具有从南向北西逐渐减薄的趋势^[7-8],太原组煤层和暗色泥岩主要展布于 3 大断裂以南,断裂以北为剥蚀区;山西组烃源岩在断裂南部和北部地区均有一定的分布。太原组—山西组烃源岩以Ⅲ型干酪根为主^[3,6],有机质成熟度(R_o)自北向南逐渐增大,主体介于 0.8%~1.4%;泊尔江海子断裂以南 R_o 一般高于 1.3%,而断裂以北什股壕地区 R_o 普遍低于 1.0%^[8-9]。

该区下石盒子组和山西组含砾粗砂岩和粗砂岩层为良好的储层。上石盒子组和石千峰组泥岩层为内陆干旱湖相沉积,发育大套泥岩,形成了一套广泛分布且厚度稳定的区域性盖层^[8]。该区上古生界生储盖等成藏要素匹配良好,具有大面积分布的上石炭统一二叠统煤系源岩、大面积的下二叠统河道砂岩储集体、大面积的源—储近源配置关系、早白垩世大范围的生烃充注过程以及上二叠统大面积的区域封盖层^[8]。

2 样品和分析测试方法

原油样品来自 JPH-353 和 JPH-2 两口井下石盒子组砂岩储层,采样井位于断裂北侧的什股壕区带南部和公卡汗地区东部(图 1),靠近主干断裂带。烃源岩样品主要来自山西组和太原组的煤系地层,在杭锦旗地区 3 条断裂带南北均有分布(图 1)。

原油的物性测试在中国石化江苏油田实验中心进行,地球化学分析测试均在中国石化油气成藏重点实验室完成。其中原油饱和烃色谱分析采用 Agilent 7890 型气相色谱仪,方法采用国家标准《地质样品有机地球化学分析方法:GB/T 18340.5—2010》;饱和烃和芳烃色谱—质谱分析采用 Agilent 5977B MSD 质谱仪,方法采用国家标准《气相色

谱—质谱法测定沉积物和原油中生物标志物:GB/T 18606—2017》;碳同位素分析采用 Thermo Fisher Delta Plus V 同位素质谱仪,方法参照国家标准《地质样品有机地球化学分析方法 第 2 部分:有机质稳定碳同位素测定同位素质谱法:GB/T 18340.2—2010》。有机岩石学采用 MSP200 显微光度计,方法采用行业标准《全岩光片显微组分鉴定及统计方法:SY/T 6414—2014》。岩石热解采用 Rock-Eval 6 岩石热解仪,方法参照国家标准《岩石热解分析法:GB/T 18602—2012》。烃源岩生烃模拟实验采用中国石化石油地质研究所自行研制的“地层孔隙热压生排烃模拟仪”进行。

3 实验结果和讨论

3.1 原油常规物理化学性质

原油肉眼观察呈深棕色,流动性较好,JPH-353 和 JPH-2 井原油样品密度分别为 0.86 g/cm³ 和 0.89 g/cm³,含硫量分别为 0.08% 和 0.27%,含蜡量分别为 15.60% 和 12.15%,黏度(50 ℃)分别为 6.96 mPa·s 和 10.42 mPa·s(表 1),均为低硫高蜡中质原油。

原油族组成以饱和烃为主,JPH-353 和 JPH-2 井原油样品中饱和烃分别占 78.36% 和 67.53%,芳烃分别占 17.28% 和 26.26%,非烃+沥青质分别为 4.36% 和 6.21%;姥芳比分别为 4.53 和 2.57,(饱+芳)/(非+沥)比值分别为 21.94 和 15.10(表 1)。杭锦旗地区上古生界原油与吐哈、柴达木盆地等典型的煤成油^[10-12]在族组成方面具相近特征。

原油经历过生物降解后,一般最初低分子的正构烷烃会选择性消耗,色谱基线的“UCM”峰会变得突出,其黏度和 API 值会发生较大变化^[13]。JPH-353 和 JPH-2 井原油饱和烃中正构烷烃分布完整(图 2),原油黏度在轻质油—正常油范围。因此,这 2 个原油未经历明显的生物降解作用。

3.2 原油成因分析

3.2.1 姥植比

研究区 2 个原油样品的姥植比(Pr/Ph)分别为 2.26 和 2.16(表 2),表明其源岩可能形成于弱氧化的沉积环境。与海相和湖相地层相比,典型的

表 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油物理性质和族组成

Table 1 Physical properties and group compositions of Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

样品号	层位	密度(20 ℃)/ (g·cm ⁻³)	黏度(50 ℃)/ (mPa·s)	硫/%	蜡/%	饱和烃/ %	芳香烃/ %	非烃+ 沥青质/%	姥芳比	(饱+芳)/ (非+沥)
JPH-353	P_{1x}	0.86	6.96	0.08	15.60	78.36	17.28	4.36	4.53	21.94
JPH-2	P_{1x}	0.89	10.42	0.27	12.15	67.53	26.26	6.21	2.57	15.10

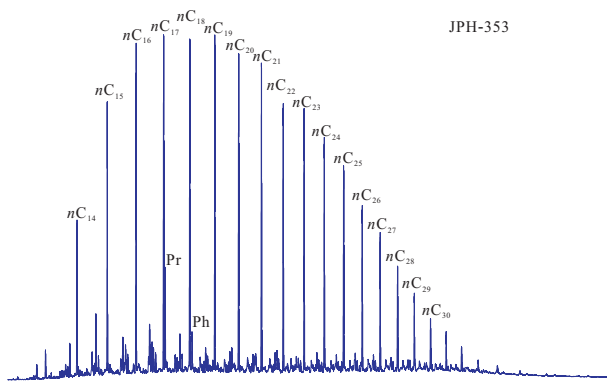


图 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区
上古生界典型原油饱和烃色谱图

Fig.2 Chromatogram of saturated hydrocarbons in Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

煤系地层原油一般具有较高的姥植比。Pr/Ph 值高是煤系地层沉积有机质及煤成油的重要特征和标志之一^[14-16]。例如,吐鲁番盆地原油 Pr/Ph 为 4.8~6^[14],西湖凹陷平湖组烃源岩的 Pr/Ph 基本在 3.0 以上^[15],塔里木盆地库车坳陷东部阳霞凹陷的煤成油 Pr/Ph 均大于 2.0^[16]。吐哈盆地和柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩及煤成油的研究表明,煤系烃源岩中煤和煤系泥岩的 Pr/Ph 值也显著不同^[14,17-18]。煤的 Pr/Ph 值一般为 5~10,碳质泥岩 Pr/Ph 一般为 3~6,而暗色泥岩一般 Pr/Ph 相对偏低,大多介于 2.5~3.0^[17-18]。本文分析的原油样品中姥植比为 2.16 和 2.26,表明其烃源岩可能形成于弱氧化的海陆过渡相沉积环境中,而非典型的强氧化煤系烃源岩。

3.2.2 甾烷系列

研究区原油中甾烷以规则甾烷和重排甾烷为主。规则甾烷(Reg)和重排甾烷(Dis)的 C₂₇-C₂₈-C₂₉分布常用来判识不同沉积环境下的有机质输入^[13]。本次研究的 2 个样品中无论规则甾烷还是重排甾烷,均以 C₂₉甾烷为主(图 3)。规则甾烷中 C₂₉占 45%~48%(表 2);C₂₇与 C₂₈含量相当,其甾烷分布为不规则“V”型(JPH-353)或反“L”

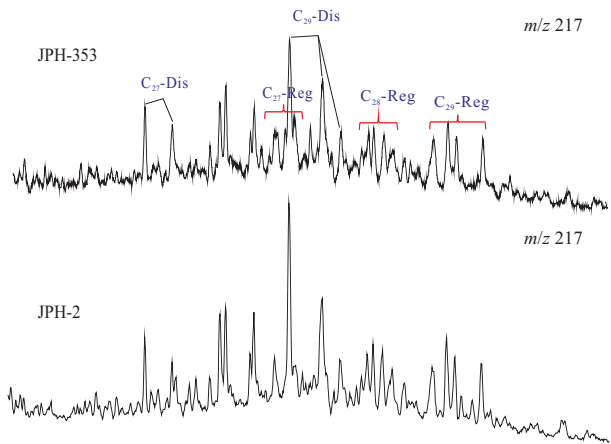


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区
上古生界原油甾烷分布特征

Fig.3 Distribution of steranes in Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

型(JPH-2)。这指示了原油样品的母质来源以陆生高等植物为主,少量来自浮游生物。

重排甾烷/规则甾烷比值也常用来甄别碳酸盐岩和碎屑岩生成的原油^[19],重排甾烷的生成与黏土矿物的催化作用有关,煤系地层中黏土矿物少,所以较泥岩地层中重排甾烷含量低^[10]。杭锦旗地区 2 个原油样品中重排甾烷的含量均相对较高,重排甾烷/规则甾烷比值分别为 1.35 和 0.71(表 2),特别是 JPH-2 原油中重排甾烷含量高于规则甾烷。因此,从重排甾烷含量推测,2 个原油应该来源于黏土含量较高的泥岩地层。

原油中甾烷/藿烷比值具有重要的母源及环境指示意义,非海相原油的规则甾烷/17 α 藿烷比值通常比较低^[13,20-21]。例如,吐哈盆地七克台地区托参 1 井、台参 1 井原油该比值均低于 0.10^[10],民和盆地侏罗系原油为 0.03^[21],印度尼西亚马哈卡姆三角洲原油也有这一特征^[22]。因此,该比值偏低被视为煤系地层成油的应有特征之一。研究区原油的甾烷/藿烷比值在 0.32~0.38 之间,规则甾烷/17 α 藿烷比值为 0.28~0.34(表 2),表明该类原油可能来自煤系地层。

表 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油地球化学参数

Table 2 Geochemical parameters of Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

样品号	地球化学参数											
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂
JPH-353	2.26	0.45	0.69	0.71	0.34	1.62	0.69	1.87	0.64	0.34	0.09	-27.7
JPH-2	2.16	0.48	0.48	1.35	0.28	2.44	0.66	1.27	0.46	0.38	0.09	-26.8

注: I₁,姥鲛烷/植烷; I₂,C₂₉规则甾烷/C₂₇-C₂₉规则甾烷; I₃,C₂₉重排甾烷/C₂₇-C₂₉重排甾烷; I₄,C₂₇-C₂₉重排甾烷/C₂₇-C₂₉规则甾烷; I₅,规则甾烷/17 α 藿烷; I₆,C₂₄四环藿烷/C₂₆三环藿烷; I₇,C₃₅藿烷(22S)/C₃₄藿烷(22S); I₈,18 α (H)-22,29,30-三降藿烷(Ts)/17 α (H)-22,29,30-三降藿烷(Tm); I₉,18 α (H)-30-降新藿烷(C₂₉Ts)/17 α (H),21 β (H)-30-降藿烷(C₂₉H); I₁₀,C₃₀重排藿烷/17 α (H),21 β (H)-C₃₀藿烷; I₁₁,伽马蜡烷/21 β (H)-C₃₀藿烷; I₁₂, $\delta^{13}C$ /‰。

3.2.3 萜烷

杭锦旗地区上古生界 2 个原油样品的萜烷均以三环萜烷、四环萜烷和五环萜烷为主(图 4)。其中三环萜烷系列化合物以较低分子量的三环萜烷(C_{19} — C_{26})为主,长链三环萜烷含量较低。三环萜烷是以 C_{19} 三环萜烷(C_{19} TT)最为丰富,随分子量增大,相对丰度逐渐下降。三环二萜烷 C_{19} — C_{20} 主要来源于维管植物生成的二萜类化合物,如松香酸,是陆相生物的标志^[13]。煤成油中三环萜烷以 C_{19} 为主峰, C_{24} 四环萜烷发育;而煤系泥岩成油一般三环萜烷比较发育,但以 C_{21} 为主峰,高于相邻的 C_{26} 三环萜烷^[15]。从三环萜烷分布来看,研究区的 2 个原油的三环和四环萜烷特征与煤成油接近。

2 个原油样品中含有丰富的四环萜烷(TeT),显著高于相邻的 C_{26} 三环萜烷(图 4),其 C_{24} TeT/ C_{26} TT 分别为 2.44 和 1.62(表 2)。这可能是与陆生高等植物有关的原油特征^[15,23]。

研究区原油中的五环三萜类主要包括藿烷类和伽马蜡烷(图 4)。藿烷(C_{27} — C_{35})系列较为完整,以 C_{30} 藿烷含量最为丰富,约占藿烷类化合物的 30% 左右;长链藿烷中 $C_{35}S/C_{34}S$ 藿烷比值较低,为 0.66~0.69(表 2),指示原油缘自相对较为氧化条件下沉积的非碳酸盐岩烃源岩,这与前文分析主要为陆相有机质生油的推论一致。

煤及煤成油中通常 Tm 远大于 Ts ,而煤系泥岩及生成的原油中 Ts 含量高,有相对高的 Ts/Tm 值^[10,16]。研究区原油 Ts/Tm 为 1.27~1.87(表 2),从地球化学性质来看,更倾向于煤系泥岩成油。 $C_{29}Ts$ 与 Ts 具有相同来源, C_{30} 重排藿烷($C_{30}DH$)被认为是起源于氧化—半氧化条件下含黏土介质的催化重排^[13]。研究区原油的 $C_{29}Ts/C_{29}H$ 分别为 0.46~0.64, C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷分别为 0.34 和

0.38,指示了 C_{30} 重排藿烷和 $C_{29}Ts$ 含量较高。煤系原油和泥岩中通常含有较高重排藿烷,而煤或煤岩中含量极低^[10,16,21]。因此,研究区原油中高含量的新藿烷和重排藿烷系列化合物指示了原油可能来自泥质烃源岩。

伽马蜡烷(g)一般出现在高盐度或温度梯度引起的分层水体中^[13],往往与有机质沉积时的强还原、高盐环境有关^[24]。对煤系地层的分析认为,煤一般形成于淡水沼泽环境,伽马蜡烷不发育, $g/C_{30}H$ 一般小于 0.05,而煤系泥岩 $g/C_{30}H$ 为 0.1 左右^[10]。本研究区原油中的伽马蜡烷含量较低, $g/C_{30}H$ 比值均为 0.09(表 2),与该区发育的海陆过渡相烃源岩形成于弱氧化—氧化沉积环境一致。因此,伽马蜡烷指示研究区原油可能与煤系地层中的泥质烃源岩有关。

3.2.4 碳同位素特征

受生源和碳源影响,高等植物来源的干酪根往往比低等生物来源的干酪根相对富集重碳同位素;Ⅲ型干酪根的 $\delta^{13}C$ 值一般大于 -26‰ 或 -25‰ ^[7,25]。研究区 2 个原油的 $\delta^{13}C$ 为 -27.7‰ ~ -26.8‰ (表 2),组分的 $\delta^{13}C$ 值也主要分布在 -28.5‰ ~ -26‰ 之间,与吐哈盆地煤成油比较接近($\delta^{13}C$ 为 -27.8‰ ~ -25.1‰)^[10],是典型的煤系地层原油的碳同位素特征。

研究区 2 个原油饱和烃的单体 $\delta^{13}C$ 值主要分布在 -31.8‰ ~ -27.8‰ 之间(图 5),低于原油的碳同位素值,这可能是不同结构化合物的有机质来源不同。 C_{14} — C_{21} 之间的正构烷烃碳同位素组成相对偏重,且随碳数增加同位素变轻。JPH-353 原油自 nC_{21} 开始,JPH-2 原油自 nC_{19} 开始,单体碳同位素变化不大,并呈现水平分布。吐鲁番盆地煤成油研究表明,煤与泥岩中正构烷烃碳同位素分布

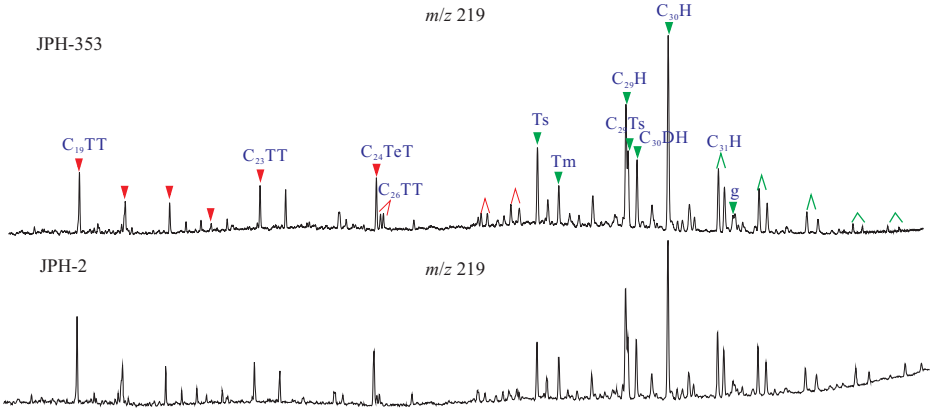


图 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油萜烷分布特征
Fig.4 Distribution of terpanes in Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

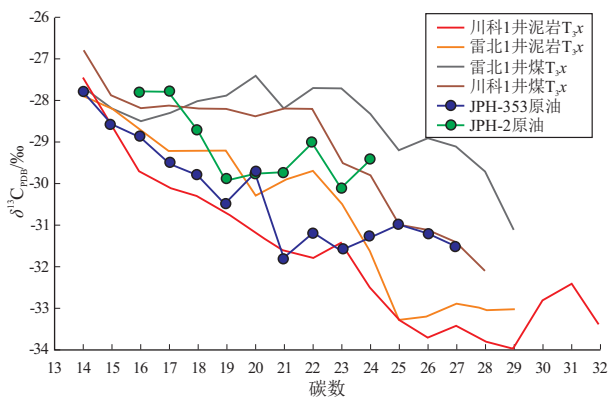


图 5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区
上古生界原油正构烷烃单体碳同位素分布曲线
川科 1 井和雷北 1 井数据引自文献[27]。

Fig.5 Distribution curves of carbon isotopic compositions
of individual *n*-alkanes in Upper Paleozoic
crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

曲线特征不同。低碳数($<C_{20}$)时,煤和煤系泥岩抽提物的分子碳同位素较为一致;高碳数($>C_{20}$)时,煤抽提物的同位素变化不大,但煤系泥岩抽提物同位素变轻,因此可以利用正构烷烃碳同位素曲线将煤和暗色泥岩生成的原油分开^[26]。朱扬明等^[27]对两者的单体碳同位素曲线进行了更细致的分析,认为煤的单体碳同位素曲线形态呈平缓型;而泥岩样品在高碳数部分会随碳数增加呈逐渐变轻的负向线型变化,而到了 C_{25} 之后,曲线会再次变得平缓。研究区原油单体碳同位素的分布特征为低碳数偏重,并随碳数增大而变轻;高碳数相对较轻,波动较小(图 5),这与煤系泥岩的正构烷烃碳同位素曲线一致。因此,认为该原油来自于陆相煤系地层的暗色泥岩。

3.3 原油主力烃源岩分析

3.3.1 原油成熟度分析

原油及与其具有亲缘关系的烃源岩往往具有相近的成熟度。杭锦旗地区上古生界原油主要属于正常的成熟原油,指示成熟度的指标如表 3。
①原油的饱和烃色谱正构烷烃不存在明显的奇偶优势; OEP 值为 0.95~1.02, CPI 为 0.97~1.08,原油 C_{21-}/C_{22+} 为 1.36~2.26,呈现成熟原油的特征。
②原油轻烃分析显示,JPH-353 原油庚烷值为 30.57,异庚烷值为 2.83,显然为成熟原油的特征。
③通过对饱和烃生物标志物分析,甾烷异构化参数 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 为 0.50~0.53; $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 为 0.48~0.50;甾烷表征成熟度的参数 $Ts/(Ts+Tm)$ 为 0.56~0.65;升藿烷差向异构体参数 $C_{31}22S/C_{31}(22S+22R)$ 为 0.54~0.58,均表明原油已处于成熟阶段^[13]。
④芳烃的成熟度参数也同样表明原油

表 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油成熟度参数

Table 3 Maturity parameters of Upper Paleozoic
crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin

成熟度参数	JPH-353	JPH-2
OEP	1.02	0.95
CPI	1.08	0.97
C_{21-}/C_{22+}	1.36	2.26
庚烷值	30.57	
异庚烷值	2.83	
C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$	0.53	0.50
C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	0.48	0.50
$Ts/(Ts+Tm)$	0.65	0.56
C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$	0.54	0.58
MPI_1	0.70	0.59
MPI_2	0.74	0.64
MPR	0.52	0.92
单金刚烷指数/%	63	64
双金刚烷指数/%	47.1	33.3

注: $MPI_1=1.5(2-MP+3-MP)/(P+1-MP+9-MP)$; $MPI_2=3\times 2-MP/(P+9-MP+1-MP)$; $MPR=(3-MP+2-MP)/(9-MP+1-MP)$ 。
样品 JPH-2 的 OEP 、 CPI 、 C_{21-}/C_{22+} 数据是根据色质 m/z 85 的峰积分得来的。

处于成熟阶段,其中甲基菲指数 MPI_1 为 0.59~0.70, MPI_2 为 0.64~0.74;甲基菲比值 MPR 为 0.52~0.92。根据 PETERS 等^[13]提出的公式折算,原油的成熟度相当于 R_o 为 0.82%~0.94%左右,处于成熟阶段。
⑤单金刚烷指数为 63%~64%,双金刚烷指数为 33.3%~47.1%,据马安来等^[28]的分析,应处于成熟—高成熟阶段。

3.3.2 烃源岩展布及成熟度

杭锦旗地区主力烃源岩平面分布呈现南厚北薄的特征。乌兰吉林庙—泊尔江海子断裂带以北暗色泥岩主体厚度为 10~30 m,煤层厚度为 10~15 m;而断裂带以南暗色泥岩厚度为 30~50 m,煤层厚度为 10~30 m^[3]。杭锦旗地区太原组主要分布在断裂以南,厚度较薄,断裂以北太原组主要为剥蚀区(图 1)。山西组则在断裂南部和北部均有一定规模的分布(图 1)^[6-8],其厚度大于太原组。目前产出原油的 JPH-353 和 JPH-2 井分别位于乌兰吉林庙和泊尔江海子断裂以北(图 1),受烃源岩展布制约,原油可能主要来自山西组烃源岩。

该区上古生界烃源岩的演化程度平面上具有南高北低的总体分布特征^[6-8]。对山西组、太原组煤层的镜质体反射率测试结果表明,断裂带以南太原组样品 R_o 为 1.04%~1.85%,平均 1.34%,山西组样品 R_o 为 1.12%~1.44%,平均 1.20%;而断裂带以北山西组样品 R_o 为 0.95%~1.02%^[3]。因此,断裂带以南地区上古生界进入生烃门限的时间为晚三

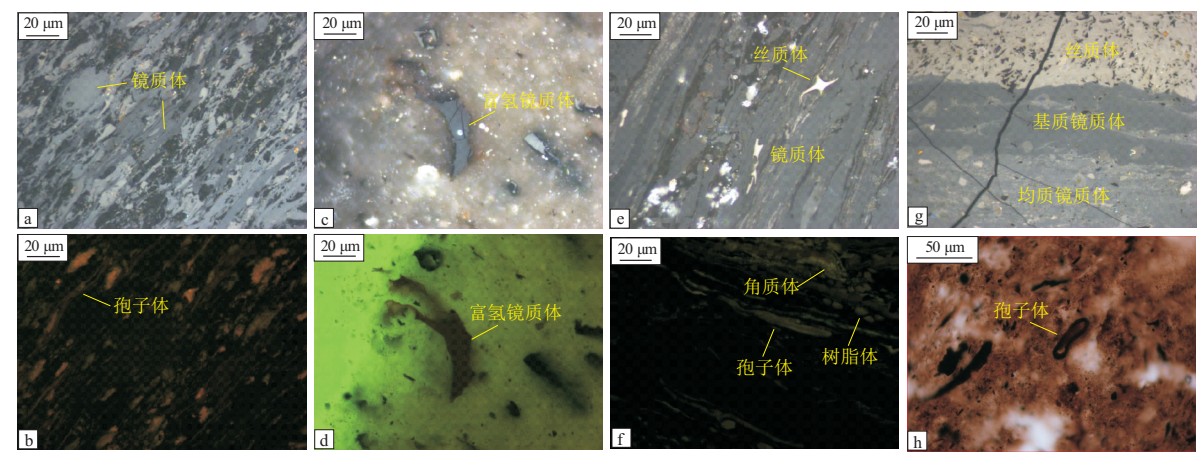


图6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界烃源岩有机岩石学照片
a-b.J116井,3 064.4 m, P_1s^1 ,煤;c-d.J78井,3 108.98 m, P_1s^2 ,煤;e-f.J35井,2 167.7 m, P_1s^2 ,碳质泥岩;g.J70井,2 976.43 m, C_3t ,煤;h.Y18井, P_1s ,煤

Fig.6 Organic petrographic photographs of the Upper Paleozoic source rocks from Hangjinqi area, Ordos Basin

叠世中晚期^[9],现今处于成熟晚期—高成熟演化阶段,以生气为主;断裂带以北地区(什股壕地区)在早侏罗世早期进入生烃门限,现仍处于生烃高峰前期演化阶段^[9],该区烃源岩具有一定的生油潜力。

3.3.3 烃源岩生烃潜力分析

干酪根显微组分分析表明,鄂尔多斯盆地中部和北部上古生界煤系烃源岩有机质类型主要为腐殖型,以生气为主^[3,6]。但对南华北地区太原组和山西组煤系显微组分研究分析时发现,类脂组(壳质组和腐泥组)分别占有机质的10%和12%^[29]。鄂尔多斯盆地中部山西组和太原组烃源岩均以Ⅲ型干酪根为主(51.6%),Ⅰ型+Ⅱ₁型干酪根仍可占到18%^[7],表明泥质烃源岩有机质并非都来自陆源生物,还有一定的水生生物输入。

烃源岩热解分析表明,山西组—太原组烃源岩氢指数大部分低于200 mg/g,生烃潜力较高的主要为煤层。有机岩石学分析表明,有机显微组分以镜质组为主,但多数样品中都含有壳质组(主要为角质体、孢子体和树脂体),J78井暗色泥岩中发现富氢镜质体,Y17、Y18井的煤中壳质组含量在5.6%~8.7%之间,J36井碳质泥岩含有16.2%的壳质组,J35井山2段的碳质泥岩,壳质组含量为5.7%(图6),氢指数最高可达248 mg/g。与吐哈盆地侏罗系等典型的煤系源岩有机显微组分组成总体面貌一致^[14,30]。

本文对山西组暗色泥岩进行了地层热压生排烃模拟实验(图7),结果表明煤岩最大生油产率可达90 kg/t以上,排出油产率可达30 kg/t;而暗色泥岩最大排出油产率可达118 kg/t,生油产率更是

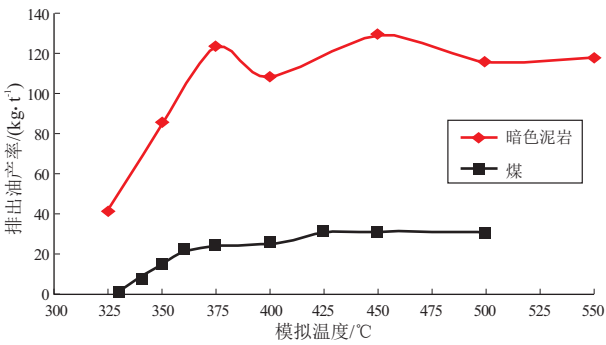


图7 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤和暗色泥岩生烃模拟排出油产率曲线
Fig.7 Oil yield curves during hydrocarbon generation simulation on Upper Paleozoic coal and dark mudstone from Hangjinqi area, Ordos Basin

达到200 kg/t以上。帅燕华等^[31]通过限定体系热解生烃模拟实验对煤和煤系泥岩的生油能力进行过研究,结果显示虽然泥岩(H/C为0.77, I_H 为146 mg/g)比中等富氢煤(H/C为0.82, I_H 为260 mg/g)的热解特征较差,但其生油量却高出煤2.7倍,是一般煤(H/C为0.75, I_H 为199 mg/g)生油潜力的6倍,证实煤系分散有机质(煤系泥岩或页岩)的生烃能力要远高于煤。

3.3.4 碳同位素对比

本次研究发现,山西组和太原组8个煤或碳质泥岩的 $\delta^{13}C$ 为-24.6‰~-22.4‰,平均-23.3‰;9个暗色泥岩 $\delta^{13}C$ 为-24.0‰~-22.1‰,平均-23.3‰(图8)。煤系地层中煤或碳质泥岩与暗色泥岩的干酪根碳同位素值无明显差异,这与四川盆地和吐哈盆地煤系地层烃源岩 $\delta^{13}C$ 值特征一致^[10,27]。资料显示,鄂尔多斯盆地南部的中生界延长组烃源岩干酪根主要为Ⅰ—Ⅱ₁型, $\delta^{13}C$ 主要

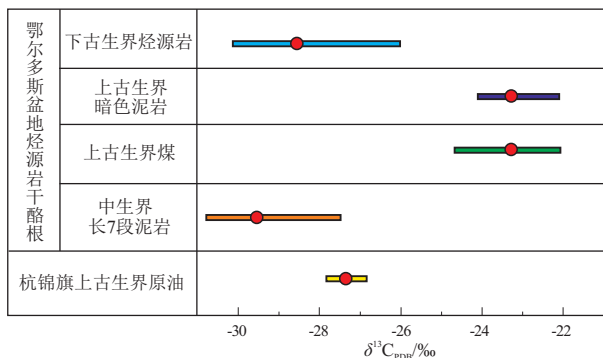


图8 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油和盆地中烃源岩干酪根碳同位素对比

中生界长7段泥岩据张斌等^[32], 下古生界烃源岩据李延钧等^[33]

Fig.8 Carbon isotopic comparison between Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area and kerogen in different source rocks from Ordos Basin

为 $-30.0‰ \sim -28.0‰$ ^[32](图8)。该区下古生界海相烃源岩干酪根类型主要为Ⅱ₁—Ⅱ₂,干酪根碳同位素组成相对较轻, $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-31.9‰ \sim -27.5‰$,平均值为 $-29.4‰$ ^[33](图8)。研究区原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-27.7‰ \sim -26.8‰$,从干酪根生烃过程中碳同位素分馏来看,一般原油会比干酪根偏轻 $2‰ \sim 3‰$ ^[34],太原组和山西组烃源岩作为生油岩,符合干酪根与热解生成的原油之间碳同位素的分馏规律。

4 勘探前景

以往对鄂尔多斯盆地上古生界的油气勘探一直是以气为主,苏里格气田、大牛地气田以及杭锦旗地区东胜气田的发现,表明该区上古生界煤系烃源岩具有较强的生烃能力。本次工作中杭锦旗地区上古生界原油的发现,反映了该区煤系地层同样具有一定的生油能力,因此,上古生界原油勘探值得重视。

杭锦旗地区生储盖组合发育较为完善,具有较好的匹配关系。该区山西组—太原组是一套海陆过渡相沉积,其分布广,成熟度适中,有机质丰度高,整体资源量较为可观。虽然有机质组成以腐殖型干酪根为主,但生烃母质中水生生物含量也不应被忽视,且煤系地层中的暗色泥岩的生油能力要强于煤层。当然,尽管上古生界烃源岩生烃特征仍是以生气为主、生油为辅,但该套地层具有较为可观的生油能力。此外,山西组、下石盒子组发育大面积分布、多期次、多层位叠加的复合储集砂体,上石盒子组和石千峰组的泥岩为该地区的油气提供了较好的盖层。因此,该区生储盖组合有利于油气的聚集。

受奥陶纪—二叠纪伊盟隆起强烈抬升影响,杭

锦旗地区以公卡汗凸起为最高区域,形成了西北高、东南低的古构造格局,其控制了奥陶系—二叠系自南向北逐层超覆的分布特征;中—新生代发生的构造反转使得东部发生隆升,形成了现今的东北高、西南低的构造格局^[35]。受构造演化的控制,杭锦旗地区南部为平缓斜坡区,二叠系逐层向北尖灭(图1)^[35]。例如,山西组烃源岩在乌兰吉林庙—泊尔江海子断裂以南分布较为稳定,且厚度普遍超过30 m,而在断裂往北则厚度逐渐减薄直至尖灭^[6];山西组和下石盒子组储集层以及上石盒子组盖层厚度也表现出自断裂往北整体逐渐减薄的特征。杭锦旗地区上古生界烃源岩热演化程度整体自南向北逐渐降低,在乌兰吉林庙断裂以南 R_o 普遍超过1.5%,达到了湿气演化阶段;在泊尔江海子断裂两侧 R_o 为1.1%左右,处于生油高峰,目前发现原油的JPH-353和JPH-2井均位于该地区;杭锦旗地区北部上古生界烃源岩逐渐减薄至尖灭,不利于油气的形成和聚集^[3]。因此,构造沉积演化、生储盖配置以及烃源岩热演化程度决定了杭锦旗地区泊尔江海子断裂两侧邻区有利于原油的聚集,是原油勘探的潜在有利区。

成藏要素差异配置分析表明,杭锦旗地区不同区带发育不同类型的圈闭,如独贵加汗区带以地层—岩性复合圈闭为主,油气的富集主要受控于储层物性和上倾方向地层尖灭封堵;十里加汗区带储层非均质性弱,圈闭类型以岩性圈闭、构造—岩性复合圈闭为主,油气富集主要受储层物性和构造条件的控制^[35]。杭锦旗地区山西组和下石盒子组致密砂岩储层大面积分布,因此,该区上古生界原油勘探有赖于对岩性储集体甜点区的精细刻画。

5 结论

(1)杭锦旗地区上古生界原油为低硫、高蜡的中质成熟油。原油Pr/Ph为2.16~2.26,规则甾烷和重排甾烷以 C_{29} 为主,重排甾烷和重排藿烷含量高,伽马蜡烷含量低,原油碳同位素值为 $-27.7‰ \sim -26.8‰$,正构烷烃单体碳同位素组成随碳数增大呈前重后轻的特征。地球化学特征表明烃源岩为弱氧化环境沉积的陆相煤系地层,原油主要来自暗色泥岩而非煤层。

(2)杭锦旗地区山西组烃源岩暗色泥岩分布广,有机显微组分以腐殖组为主,含有少量腐泥组,具有生成正常油—轻质油的能力。山西组烃源岩成熟度与原油成熟度相近,干酪根与原油碳同位素差值符合分馏规律。结合地质构造和烃源岩空间

展布,推测山西组暗色泥岩生油的可能性较大。

(3)杭锦旗地区上古生界烃源岩生烃特征以生气为主、生油为辅,但其具有较为可观的生油能力。构造沉积演化、生储盖配置以及烃源岩热演化程度决定了泊尔江海子断裂两侧邻区有利于原油的聚集,是原油勘探的潜在有利区。该区上古生界原油勘探有赖于对岩性储集体甜点区的精细刻画。

致谢:本次工作得到了刘光祥教授级高级工程师和吴小奇高级工程师的协助,样品采集得到了中国石化华北油气分公司的大力支持,审稿专家对初稿提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] 戴金星,倪云燕,董大忠,等.“十四五”是中国天然气工业大发展期;对中国“十四五”天然气勘探开发的一些建议[J]. 天然气地球科学,2021,32(1):1-16.

DAI Jinxing, NI Yunyan, DONG Dazhong, et al. 2021-2025 is a period of great development of China's natural gas industry: suggestions on the exploration and development of natural gas during the 14th Five-Year Plan in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 1-16.

[2] 齐荣,何发岐,王付斌,等.鄂尔多斯盆地南部长探1井上古生界勘探突破及意义[J].中国石油勘探,2021,26(3):68-78.

QI Rong, HE Faqi, WANG Fubin, et al. Exploration breakthrough of Upper Paleozoic of well Changtan 1 in southern Ordos Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 68-78.

[3] 倪春华,朱建辉,刘光祥,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价[J].石油实验地质,2021,43(5):826-834.

NI Chunhua, ZHU Jianhui, LIU Guangxiang, et al. Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 826-834.

[4] 刘友民.陕甘宁盆地北缘乌兰格勒地区白垩系油苗成因及意义[J].石油勘探与开发,1982,9(3):39-43.

LIU Youmin. Genesis and significance of Cretaceous oil seeps in Wulanger area, northern margin of Shaanxi - Gansu - Ningxia Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(3): 39-43.

[5] 李剑锋,马军,咎川莉,等.鄂尔多斯盆地上古生界凝析油成因研究[J].天然气地球科学,2012,23(2):313-318.

LI Jianfeng, MA Jun, ZAN Chuanli, et al. Genesis of Upper Paleozoic condensates in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 313-318.

[6] 纪文明,李莲蓬,刘震,等.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界气源岩分析[J].天然气地球科学,2013,24(5):905-914.

JI Wenming, LI Weilian, LIU Zhen, et al. Research on the Upper Paleozoic gas source of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 905-914.

[7] 李浩.鄂尔多斯盆地中部上古生界烃源岩研究[D].西安:西北大学,2015.

LI Hao. Research of source rocks in Upper Paleozoic, central Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.

[8] 郝蜀民,李良,张威,等.鄂尔多斯盆地北缘石炭系一二叠系大型气田形成条件[J].石油与天然气地质,2016,37(2):149-154.

HAO Shumin, LI Liang, ZHANG Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.

[9] 赵桂萍.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界烃源岩热演化特征模拟研究[J].石油实验地质,2016,38(5):641-646.

ZHAO Guiping. Thermal evolution modeling of Neopaleozoic source rocks in Hangjinqi region, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 641-646.

[10] 陈建平,黄第藩,李晋超,等.吐哈盆地侏罗纪煤系油气主力源岩探讨[J].地质学报,1999,73(2):140-152.

CHEN Jianping, HUANG Difan, LI Jinchao, et al. Main source rocks of petroleum from Jurassic coal-bearing strata in the Turpan-Hami Basin, northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(2): 140-152.

[11] 包建平,马安来,黄光辉,等.三塘湖盆地原油地球化学特征及其成因类型[J].石油勘探与开发,1999,26(4):25-29.

BAO Jianping, MA Anlai, HUANG Guanghui, et al. The origin and geochemical characteristics of crude oils from Santanghu Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 25-29.

[12] 苏爱国,朱扬明,梁狄刚,等.青海柴达木盆地南八仙油气田油源与成藏机理[J].地球化学,2003,32(4):393-399.

SU Aiguo, ZHU Yangming, LIANG Digang, et al. Source of oils and mechanism of reservoir-formation of the Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin, Qinghai Province, China [J]. Geochimica, 2003, 32(4): 393-399.

[13] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide, biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history, volume 2 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[14] 程克明,张朝富.吐鲁番—哈密盆地煤成油研究[J].中国科学(B辑),1994,24(11):1216-1222.

CHENG Keming, ZHANG Chaofu. Study on coal-derived oils in Turpan-Hami Basin [J]. Science in China (Series B), 1994, 24(11): 1216-1222.

[15] 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.

[16] 赵孟军,肖中尧,彭燕,等.煤系泥岩和煤岩生成原油的地球化学特征[J].石油勘探与开发,1998,25(5):8-10.

ZHAO Mengjun, XIAO Zhongyao, PENG Yan, et al. Geochemistry of oils from coal and from the shale in coal measure strata [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 8-10.

[17] 包建平,吴浩,朱翠山,等.柴达木盆地北缘牛东地区煤成油及其地球化学特征[J].地质学报,2018,92(5):1056-1069.

- BAO Jianping, WU Hao, ZHU Cuishan, et al. Geochemical characteristics of coal-derived oils in the Niudong area in the northern Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(5): 1056–1069.
- [18] 程克明, 赵长毅, 苏爱国, 等. 吐哈盆地煤成油气的地质地球化学研究[J]. *勘探家*, 1997, 2(2): 5–10.
- CHENG Keming, ZHAO Changyi, SU Aiguo, et al. Geological and geochemical studies on coal-formed oil and gas in Turpan–Hami Basin[J]. *Petroleum Explorationist*, 1997, 2(2): 5–10.
- [19] MELLO M R, TELNAES N, GAGLIANONE P C, et al. Organic geochemical characterization of depositional palaeoenvironments of source rocks and oils in Brazilian marginal basins[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13(1/3): 31–45.
- [20] MOLDOWAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1255–1268.
- [21] 王春江, 王有孝, 罗斌杰, 等. 民和盆地中侏罗统煤—油页岩层系生油特征[J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 60–64.
- WANG Chunjiang, WANG Youxiao, LUO Binjie, et al. Characteristics of the oil formation in the Middle Jurassic coal shale strata in the Minhe Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 60–64.
- [22] HOFFMANN C F, MACKENZIE A S, LEWIS C A, et al. A biological marker study of coals, shales and oils from the Mahakam Delta, Kalimantan, Indonesia[J]. *Chemical Geology*, 1984, 42(1/4): 1–23.
- [23] PHILP R P, BRASSELL S. Arguments against abiogenic origin for hydrocarbons[J]. *Chemical & Engineering News*, 1986, 64(50): 2.
- [24] 张立平, 黄第藩, 廖志勤. 伽马蜡烷: 水体分层的地球化学标志[J]. *沉积学报*, 1999, 17(1): 136–140.
- ZHANG Liping, HUANG Difan, LIAO Zhiqin. Gammacerane: Geochemical indicator of water column stratification[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1): 136–140.
- [25] 黄第藩, 李晋超, 张大江. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J]. *沉积学报*, 1984, 2(3): 18–33.
- HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 2(3): 18–33.
- [26] SUN Yongge, SHENG Guoying, PENG Ping'an, et al. Compound-specific stable carbon isotope analysis as a tool for correlating coal-sourced oils and interbedded shale-sourced oils in coal measures: an example from Turpan Basin, north-western China[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(12): 1349–1362.
- [27] 朱扬明, 李颖, 郝芳, 等. 四川盆地海、陆相烃源岩有机质稳定碳同位素组成变化及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1254–1264.
- ZHU Yangming, LI Ying, HAO Fang, et al. Compositional variations and geochemical significances of stable carbon isotope for organic matters from marine and terrestrial source rocks in Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1254–1264.
- [28] 马安来, 林会喜, 云露, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层原油金刚烷化合物分布及意义[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(3): 334–346.
- MA Anlai, LIN Huixi, YUN Lu, et al. Characteristics of diamondoids in oils from the ultra-deep Ordovician in the North Shuntuoguole area in Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(3): 334–346.
- [29] 程克明, 熊英, 马立元, 等. 华北地台早二叠世太原组 and 山西组煤沉积模式与生烃关系研究[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 142–146.
- CHENG Keming, XIONG Ying, MA Liyuan, et al. Relationship between coal depositional modes and hydrocarbon generation of the Early Permian Taiyuan and Shanxi Formation in Huabei Platform[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 142–146.
- [30] 苏传国, 朱建国, 孟旺才, 等. 吐哈盆地“煤成油”问题再认识[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(4): 453–458.
- SU Chuanguo, ZHU Jianguo, MENG Wangcai, et al. Re-discussion of coal-formed oil mechanism in Turpan–Hami Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(4): 453–458.
- [31] 帅燕华, 张水昌, 陈建平. 煤和煤系泥岩生油能力再评价[J]. *地球化学*, 2009, 38(6): 583–590.
- SHUAI Yanhua, ZHANG Shuichang, CHEN Jianping. Comparison of the oil potential of coal and coaly mudstone[J]. *Geochimica*, 2009, 38(6): 583–590.
- [32] 张斌, 毛治国, 张忠义, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段黑色页岩形成环境及其对页岩油富集段的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1–10.
- ZHANG Bin, MAO Zhiguo, ZHANG Zhongyi, et al. Black shale formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1127–1136.
- [33] 李延钧, 陈义才, 杨远聪, 等. 鄂尔多斯下古生界碳酸盐烃源岩评价与成烃特征[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(4): 349–353.
- LI Yanjun, CHEN Yicai, YANG Yuancong, et al. Source rock evaluation and characteristics of hydrocarbon generation from Lower Paleozoic carbonate in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(4): 349–353.
- [34] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- WANG Darui. Stable isotope geochemistry of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [35] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 39–49.
- HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 39–49.