

文章编号:1672-6561(2016)02-0196-10

鄂尔多斯盆地中生界湖相油型油的 精细划分与油源对比

杨 华^{1,2}, 张文正^{1,3,4}, 彭平安⁴, 刘 飞³, 罗丽荣³

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油长庆油田分公司, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710021; 4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘 要:含油盆地同一类型原油的精细划分与油源对比是有机地球化学研究的重要课题。大量样品的 GC-MS 分析资料显示,与鄂尔多斯盆地中生界延长组湖相烃源岩的 $17\alpha(\text{H})\text{-C}_{30}$ 重排藿烷 (C_{30}^*) 相对丰度的变化特征相耦合,原油的 C_{30}^* 相对丰度也表现出了较为明显的差异性与规律性,并且 C_{30}^* 相对丰度的变化与重排甾烷、 C_{29}Ts 、 Ts 等具有良好的关联性。因而,以 C_{30}^* 相对丰度为主要依据,进行 $\text{C}_{30}^*/\text{C}_{29}$ 降藿烷值- $\text{C}_{30}^*/\text{C}_{30}$ 藿烷值、 $\text{C}_{29}\text{Ts}/\text{C}_{29}$ 降藿烷值- $\text{C}_{30}^*/\text{C}_{30}$ 藿烷值等图解分析,可将中生界湖相油型油细分为异常高的 C_{30}^* 相对丰度、较高—高的 C_{30}^* 相对丰度和低 C_{30}^* 相对丰度等 3 类。在此基础上,开展油岩的甾烷、萜烷生物标志物的分布特征及相关参数、单体烃碳同位素组成等的对比,进一步结合烃源岩的发育特征、成藏组合特征等进行综合分析。结果表明:长 7 优质烃源岩(油页岩)是盆地中生界的主力烃源岩,长 7、长 9 黑色泥岩是次要烃源岩,长 6、长 8 暗色泥岩对油源的贡献有限。中生界油源供给呈“—源主导、多源参与”的特征。这一认识对于盆地中生界资源评价与进一步勘探具有指导意义。

关键词:有机地球化学; $17\alpha(\text{H})\text{-重排藿烷}$; 生物标志物; 单体烃碳同位素; 油源对比; 烃源岩; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P618.13; TE122.1⁺14 文献标志码: A

Oil Detailed Classification and Oil-source Correlation of Mesozoic Lacustrine Oil in Ordos Basin

YANG Hua^{1,2}, ZHANG Wen-zheng^{1,3,4}, PENG Ping-an⁴, LIU Fei³, LUO Li-rong³

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The oil detailed classification and oil-source correlation are important topics for organic geochemistry in petroliferous basins. Analysis with GC-MS reveals that the relative abundances of $17\alpha(\text{H})\text{-C}_{30}$ diahopanes (C_{30}^*) are various both in Mesozoic Yanchang Formation lacustrine

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40773028, 41473046)

作者简介: 杨 华(1963-), 男, 山东菏泽人, 中国石油长庆油田分公司教授级高级工程师, 理学博士,
E-mail: yh_cq@petrochina.com.cn.

通讯作者: 张文正(1960-), 男, 浙江浦江人, 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院教授级高级工程师,
E-mail: zwz_cq@petrochina.com.cn.

source rocks and oils of Ordos Basin. Correspondingly, the contents of rearranged sterane, C_{29} Ts and Ts are also different. Therefore, according to the abundance of C_{30}^* , such as the diagrams of C_{30}^*/C_{29} norhopane value- C_{30}^*/C_{30} hopane value and C_{29} Ts/ C_{29} norhopane value- C_{30}^*/C_{30} hopane value, the Mesozoic lacustrine oil can be divided into three genetic types including exceptional richness of C_{30}^* , relative richness of C_{30}^* and lower C_{30}^* contents. By studying the distribution of sterane and terpane biomarkers in oil-source rock with relevant parameters, and carbon isotopic compositions of monomer hydrocarbon, based on source rock distribution and reservoir forming combination, it has been proved that Chang-7 high-quality sources are the main oil source rocks in Mesozoic reservoirs of Ordos Basin, and the black mudstones of Chang-7 and Chang-9 are the secondary source rocks, while the contribution of dark mudstone of Chang-6 and Chang-8 is limited. In conclusion, the Mesozoic oil supply is characterized by "one source is dominating, multiply sources are participated". This study is significant in Mesozoic resource assessment and further exploration of Ordos Basin.

Key words: organic geochemistry; $17\alpha(H)$ -diahopanes; biomarker; carbon isotope of monomer hydrocarbon; oil-source correlation; source rock; Ordos Basin

0 引 言

鄂尔多斯盆地是中国典型的大型低渗透陆相油气盆地,中生界低渗透储层(特别是延长组低渗透、致密性碎屑岩储层)含油普遍,油气资源十分丰富^[1]。长期的石油勘探揭示,盆地中生界含油层组多,从中侏罗统直罗组一直到上三叠统延长组底部的长 10 油层组均已发现工业油流(藏),含油层段在纵向上的最大跨度约 1 000 m。其中延安组延 9、延 10 油层组和延长组长 2~长 8 油层组是目前主要的产油层组。由于含油层位多,纵向跨度大,因而准确厘定油与源岩的空间关系,明确主力源岩与成藏组合,不仅有助于石油运聚特征与分布规律的研究,而且对于进一步的石油勘探也具有重要的指导意义。

自 20 世纪 80 年代以来,已有不少学者开展了中生界石油成因和油源对比研究^[2-9],并且一致认为中生界原油为典型的湖相油型油,源岩为长 4+5—长 8 半深湖—深湖相腐泥、混合型暗色泥岩烃源岩。近年来,又有学者对新近的勘探区带进行了烃源岩地球化学与油源对比研究^[10-15]。由于长 4+5—长 8 烃源岩的母质性质相似,成熟度差别不大,所以常用的地球化学参数不易区分。因而,以往的研究未能对中生界湖相油型油进行细致划分,并通过油岩对比准确厘定主力烃源岩。随着中生界石油勘探的不断深入,烃源岩地球化学研究也取得了重大进展,不仅在长 7 油层组厘定了大规模发育的富有机质优质烃源岩^[16],而且在长 9 油层组揭示了有机质丰度较高的黑色泥页岩烃源岩^[17]。因此,对全盆地中生界油源进行整体

性研究,准确厘定主力烃源岩是很有必要的。

本文针对鄂尔多斯盆地中生界石油地质实际,以烃源岩地球化学研究取得的最新进展为基础^[16-20],主要应用生物标志物和单体烃碳同位素资料,以长 6~长 9 湖相烃源岩为主要研究对象,进行湖相油型油的精细分类与油源对比,以确定盆地中生界主力烃源岩,为进一步进行石油勘探提供科学依据。

1 中生界湖相油型油的精细分类

以往研究和最新的测试资料均显示:鄂尔多斯盆地中生界各地区、各产层原油均具有姥植均势、低伽马蜡烷的特征; $\alpha\alpha\alpha$ -(20R)原生甾烷主要呈“V”字型分布, C_{29} 最大, C_{27} 次之, C_{28} 最小;原油及轻烃和正构烷烃单体烃碳同位素组成偏轻,原油为淡水—微咸水湖相油型油^[2-3,7];成因类型单一。然而,从甾烷、萜烷分布特征来看,原油中 $17\alpha(H)$ - C_{30} 重排藿烷(C_{30}^*)相对丰度却存在着明显的差异性(图 1)。有关研究认为,具较高—高 C_{30}^* 的烃源岩发育于偏酸性、亚氧化环境,呈较高的热演化程度,且富含黏土^[20-26]。因此,原油中 C_{30}^* 相对丰度的差异是烃源岩发育环境和岩石组构(岩性)差异性的反映^[20,26],可作为同类型原油精细分类与对比的依据^[14-15,26]。根据大量测试资料,以 C_{30}^* 相对丰度(以 C_{30}^*/C_{30} 藿烷值反映)为主要依据,结合其他地球化学参数,可将中生界油型油细分为 3 类:Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类。运用 C_{30}^*/C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值、 C_{29} Ts/ C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值分类图解(图 2、3)可以清晰地将 3 类原油加以区分。

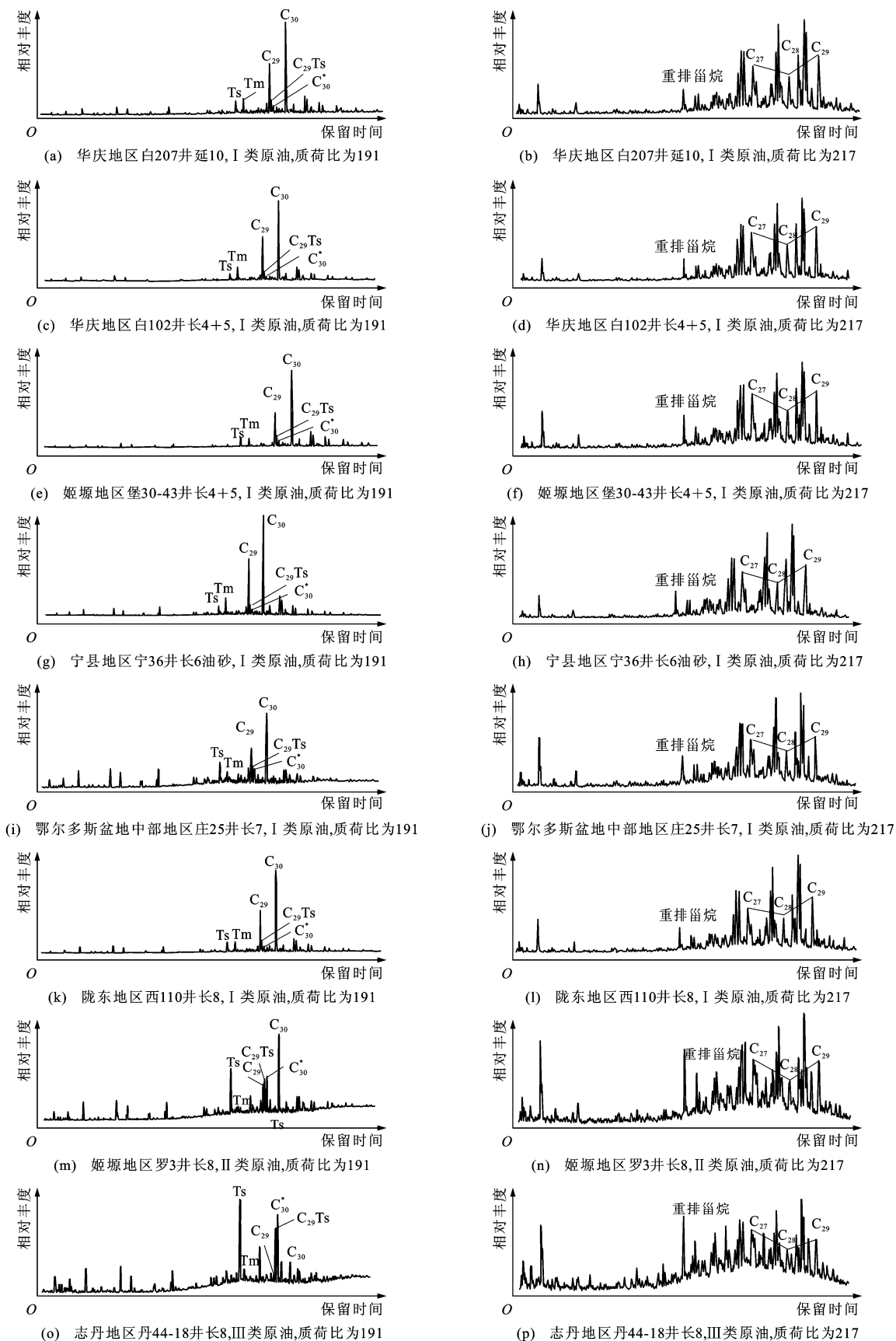


图1 原油甾烷、萜烷质量色谱

Fig. 1 Mass Chromatograms of Sterane and Terpane of Oils

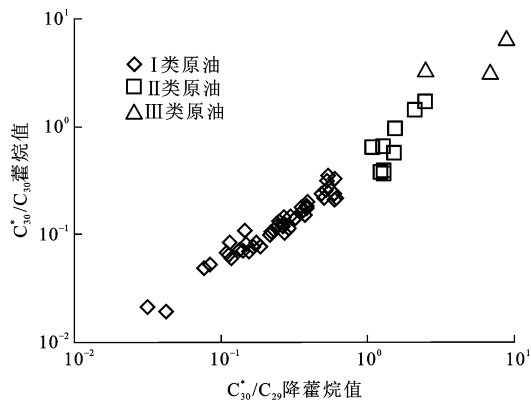


图 2 原油 C_{30}^*/C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值分类图解
Fig. 2 Classification Diagram of C_{30}^*/C_{29} Norhopane Value- C_{30}^*/C_{30} Hopane Value of Oil

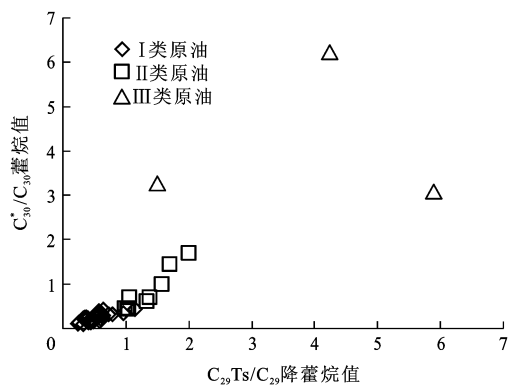


图 3 原油 $C_{29} Ts/C_{29}$ 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值分类图解
Fig. 3 Classification Diagram of $C_{29} Ts/C_{29}$ Norhopane Value- C_{30}^*/C_{30} Hopane Value of Oil

1.1 I 类原油

I 类原油 C_{30}^* 相对丰度低。重排甾烷、降新藿烷($C_{29} Ts$)、 Ts 等也为低—较低(图 1)。 C_{30}^*/C_{30} 藿烷值一般低于 0.3, $C_{29} Ts/C_{29}$ 降藿烷值一般低于 0.6, C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷值低于 0.15, 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值一般低于 0.2, Ts/Tm 值变化较大, 分布于 0.5~2.0。I 类原油在盆地中生界各地区、各油层组广泛分布, 是最主要的原油类型。

1.2 II 类原油

II 类原油 C_{30}^* 相对丰度较高—高。各项参数介于 I 类原油与 III 类原油之间。其主要特征为 $C_{29} Ts$ 、 Ts 、 C_{30}^* 明显比 I 类原油高, C_{30}^* 、 $C_{29} Ts$ 与 C_{29} 降藿烷的峰高相近, 重排甾烷的丰度也相对较高(图 1)。相应地, C_{30}^*/C_{30} 藿烷值(0.35~1.60)、 $C_{29} Ts/C_{29}$ 降藿烷值(0.95~1.62)、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷值(0.13~0.24)、伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值(0.07~0.74)、 Ts/Tm 值(2.29~4.60)等参数也较高。II 类原油目前主要发现于湖盆西北部姬塬地区的长 4+5、长 8、长 9 油

层组和湖盆中部上里塬地区的长 8₂。

1.3 III 类原油

III 类原油 C_{30}^* 相对丰度异常高。重排甾烷相对丰度也高, Ts 丰度高; 相应地, C_{30} 藿烷等正常藿烷的相对丰度明显偏低(图 1)。 C_{30}^*/C_{30} 藿烷值(大于 1.85)、 $C_{29} Ts/C_{29}$ 降藿烷值(大于 1.0)、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷值(大于 0.45)、伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值(大于 0.25)、 Ts/Tm 值(大于 3.5)等参数高。该类原油较少分布, 目前发现于陕北志丹地区长 9₁ 黑色泥页岩烃源岩分布区。

2 甾烷、萜烷生物标志物参数对比

湖盆构造沉积演化与烃源岩的地球化学研究表明: 长 7 期在强烈的区域地球动力背景下产生了晚三叠世湖盆的最大湖泛, 在湖盆中部的广大范围沉积了富含有机质的油页岩(优质烃源岩)^[16], 而暗色泥岩总体不太发育, 厚度一般小于 15 m, 仅在湖盆北部的半深湖沉积相带较为发育, 累计厚度可达 30~100 m; 长 9 期为湖盆发展初期的次一级湖泛期, 仅在陕北志丹地区南部的局部凹陷发育厚度为 5~18 m 的暗色泥页岩^[17]; 长 6、长 8 油层组暗色泥岩不太发育, 仅在湖盆振荡沉降期的局部较深水区发育暗色泥岩, 单层薄, 累计厚度一般小于 10 m; 长 4+5 油层组暗色泥岩更不发育。基于此, 本文选择长 6、长 7、长 9 烃源岩作为主要对象进行油岩对比。

由于长 7 油页岩与长 6、长 7、长 9 暗色泥岩的母质类型相近, 均属以湖生藻类为主的腐泥-混合型烃源岩, 所以均具有低伽马蜡烷、低 C_{30} 莫烷、 $\alpha\alpha\alpha(20R)$ 原生甾烷呈“V”字型分布(C_{29} 最大, C_{27} 次之, C_{28} 最少)的特征(图 4)。与原油相类似, 长 6~长 9 烃源岩的 C_{30}^* 相对丰度也存在明显的差异性与规律性, 长 7 油页岩以低—较低的 C_{30}^* 、较低的重排甾烷、较低的 Ts 为特征(图 4)。志丹地区长 7、长 9 暗色泥岩(丹 48、49 井)具有很高 C_{30}^* 相对丰度、高重排甾烷、高 Ts 、异常低正常藿烷的显著特征^[20,25]。长 6~长 8 暗色泥岩以较高—高的 C_{30}^* 、较高的 $C_{29} Ts$ 、较高的重排甾烷为特征。因此, 以 C_{30}^* 相对丰度等相关参数为主要依据, 可以有效地进行油、源岩的划分与对比。

2.1 I 类原油与烃源岩对比

从 C_{30}^*/C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值、 $C_{29} Ts/C_{29}$ 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值等油岩对比图(图 5、6)上可以清楚地看出, I 类原油与长 7 优质烃源岩的对比关系最好, 与少部分长 7 黑色泥岩具一定的可比性, 与其他烃源岩的可比性差。根据上述对比结果,

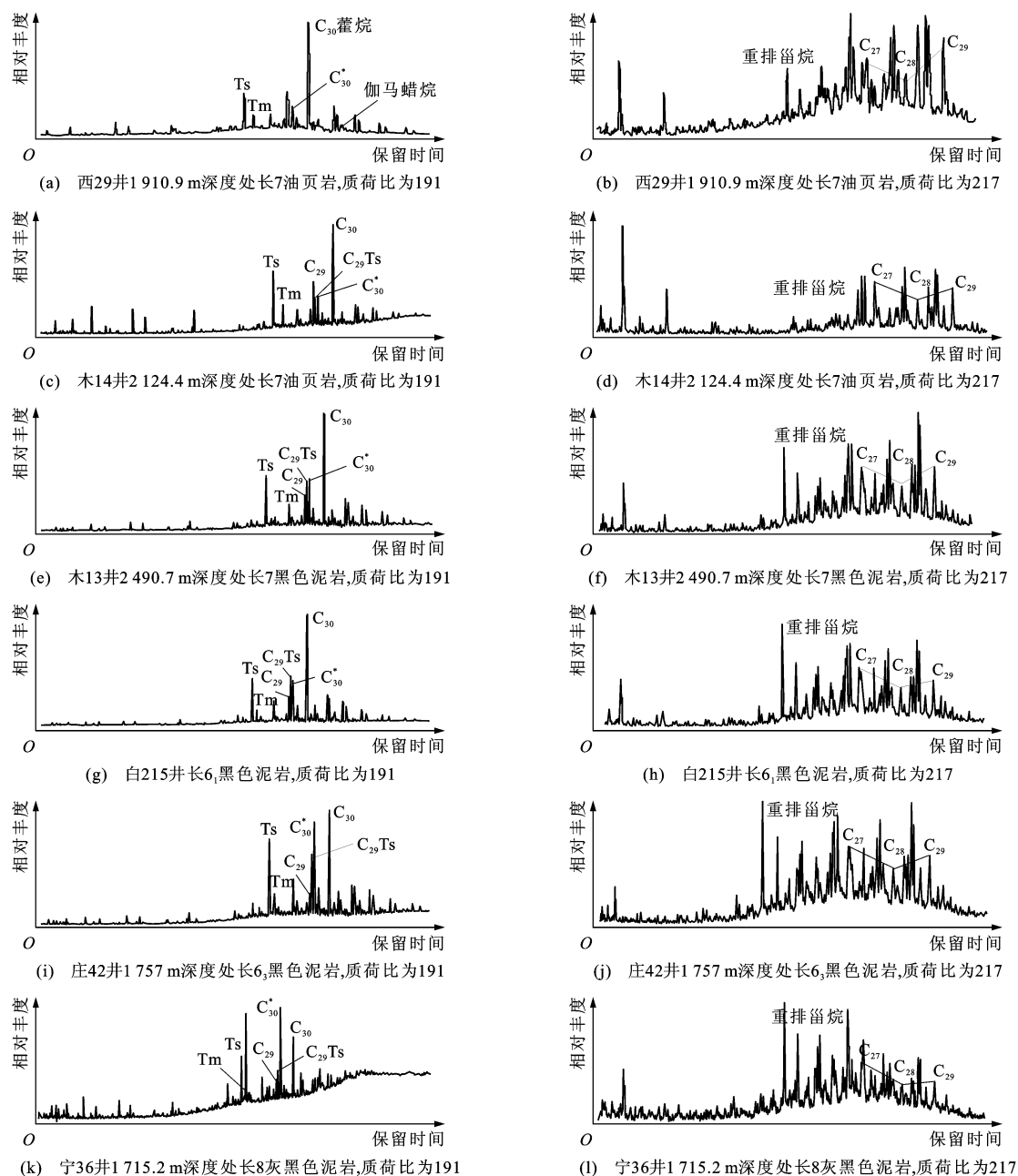


图4 长6~长9烃源岩甾烷、萜烷质量色谱

Fig. 4 Mass Chromatograms of Sterane and Terpane of Source Rocks from Chang-6 to Chang-9

结合盆地延长组烃源岩的发育状况,可以确定长7优质烃源岩是盆地内分布最广、规模最大的Ⅰ类原油的主要源岩。

单井的油源对比进一步佐证上述结果。以宁36井为例,该井位于湖盆南部地区的甘肃省宁县境内。该井从长4+5~长8取芯较全,岩芯观察、测井资料解释(识别烃源岩)、地球化学测试资料等显示,该井长6、长7致密砂岩储层普遍含油(图7)。烃源岩的发育状况为:长7油层组下段发育了15 m的油页岩,21个样品的平均总有机碳(TOC)为

22.65%,干酪根的平均 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -28.98% (10个样品),母质类型为Ⅱ₁型,镜质体反射率(R_o)为0.93%~0.97%(2个样品),属优质烃源岩;长6油层组的暗色泥岩累计厚度不到6 m;其他油层组则少见有机质丰度较高的黑色泥岩,累计厚度很小。根据烃源岩的发育状况可以判断长7油页岩应为主力烃源岩。GC-MS分析显示,该井长6、长7储层原油的甾烷、萜烷化合物分布特征相似,均显示低 C_{30}^* 等的Ⅰ类原油特征(图1、7),与油页岩具有良好的对比关系,与长6、长8灰黑色泥岩的对比关系为较

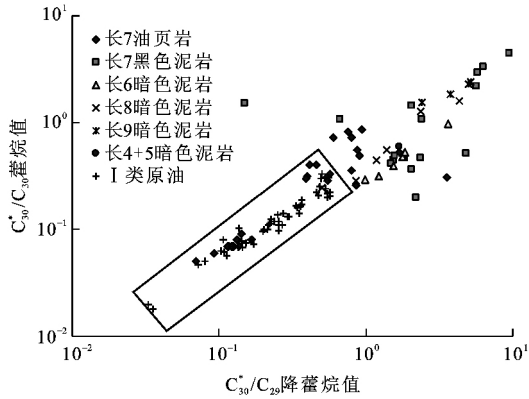


图 5 I 类原油与烃源岩的 C_{30}^*/C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值对比

Fig. 5 Correlation of Type I Oil and Source Rocks Between C_{30}^*/C_{29} Norhopane Value and C_{30}^*/C_{30} Hopane Value

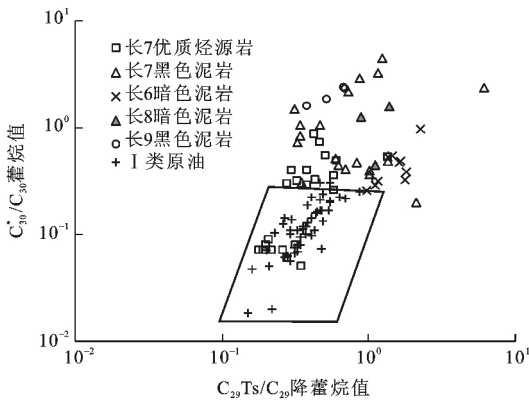


图 6 I 类原油与烃源岩的 $C_{29}Ts/C_{29}$ 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值对比

Fig. 6 Correlation of Type I Oil and Source Rocks Between $C_{29}Ts/C_{29}$ Norhopane Value and C_{30}^*/C_{30} Hopane Value

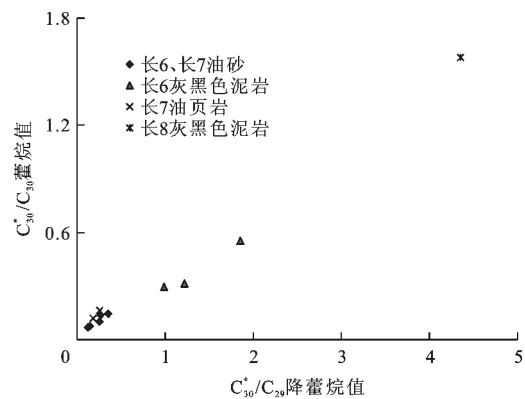


图 7 宁 36 井延长组原油与烃源岩的 C_{30}^*/C_{29} 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值对比

Fig. 7 Correlation of Oils and Source Rocks of Yanchang Formation Between C_{30}^*/C_{29} Norhopane Value and C_{30}^*/C_{30} Hopane Value from Well Ning36

差一差(图 7)。油源对比结果与实际烃源岩发育状况相吻合。

2.2 II 类原油与烃源岩对比

$C_{29}Ts/C_{29}$ 降藿烷值、 C_{30}^*/C_{30} 藿烷值、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 值等参数的对比(图 8、9)显示,II 类原油与长 6 暗色泥岩的对比关系最好,与部分长 7 优质烃源岩(里 68 井、里 57 井)、部分长 7 黑色泥岩、长 8 暗色泥岩、长 9 黑色泥岩均存在一定的可比性。但是,从 II 类原油的分布、烃源岩的发育状况与成藏组合等综合分析可以弥补上述不足,目前 II 类原油主要分布于长 8、长 9 油层组;从成藏关系判断,长 6 黑色泥岩作为源岩(II 类原油)的可能性不大。从地区来看,II 类原油主要出现于姬塬地区,相对其他地区而言,该区长 7 黑色泥岩最为发育(区块的西部),长 7 油页岩较发育,应是主力烃源岩,其他油层组烃源岩

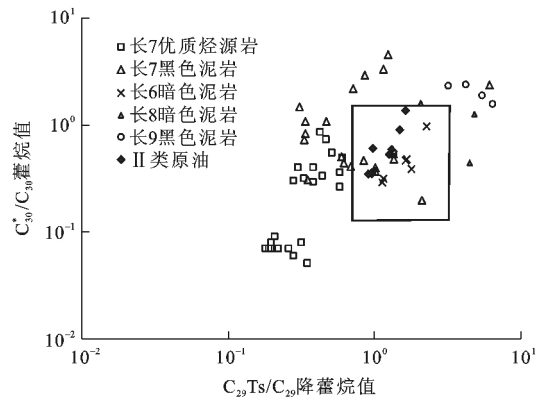


图 8 II 类原油与烃源岩的 $C_{29}Ts/C_{29}$ 降藿烷值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值对比

Fig. 8 Correlation of Type II Oil and Source Rocks Between $C_{29}Ts/C_{29}$ Norhopane Value and C_{30}^*/C_{30} Hopane Value

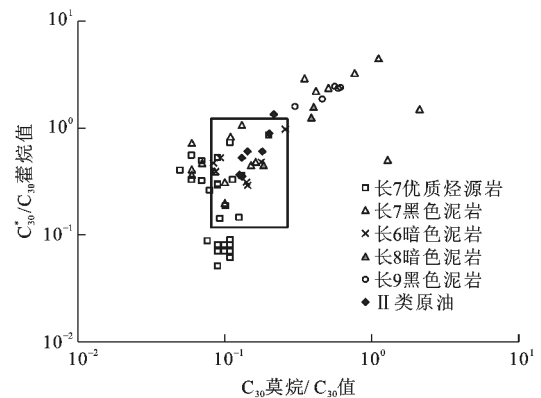


图 9 II 类原油与烃源岩 C_{30} 莫烷/ C_{30} 值- C_{30}^*/C_{30} 藿烷值对比

Fig. 9 Correlation of Type II Oil and Source Rocks Between C_{30} Moretane/ C_{30} Value and C_{30}^*/C_{30} Hopane Value

的发育规模则很有限。同时,该区的峰2井在长4+5、长8、长9砂岩储集层均获得较高产量的油流,原油地球化学特征十分相似,均属II类原油(图10),这3层原油同源的可能性很大。因此,根据该区延长组湖相烃源岩的发育状况、原油的空间分布特征和成藏组合关系,可以判断长7黑色泥岩(可能包括长7油页岩)仍应是II类原油的主要源岩。姬塬地区罗3井长8原油(II类,图1)、峰2井原油(图10)与盐56井、木13井长7黑色泥岩(图4)之间的萜烷、甾烷化合物的分布特征表现出很好的相似性,因而有力地支持了上述判断。

2.3 III类原油与烃源岩对比

由于III类原油目前仅发现于志丹地区的长8、长9油层组,而且与该地区长9、长7黑色泥岩具明显的可比性,与其他地区、层位的烃源岩可比性差。进一步从成藏组合考虑,长9₁黑色泥岩应是该区长8、长9油层组III类原油的源岩^[19]。

3 单体烃碳同位素对比

以往的中生界原油正构烷烃单体烃系列碳同位

素的研究认为,盆地各地区、各产层原油均具有正构烷烃单体烃系列碳同位素组成富¹³C和碳同位素分馏模式呈平稳型的湖相油型油特征^[3,27]。本文采用的烃源岩与原油样品正构烷烃单体烃碳同位素资料均由中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成。由于GC-IRMS分析直接采用正构烷烃组分(尿素络合提取),所以测试精度得到了较大提高, $\delta^{13}\text{C}$ 值绝对偏差优于 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

不同区块、各个产层的36个原油样品单体烃碳同位素测试结果显示(图11),中生界原油样品之间同一碳数的单体烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为接近,如绝大部分样品 $n\text{C}_{20}$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 $-32.7\text{‰} \sim -30.5\text{‰}$ 之间、 $n\text{C}_{25}$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 $-32.2\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ 之间。同一样品不同碳数正构烷烃之间的碳同位素组成也较为接近,分布模式均呈平坦型。从地区来看,姬塬地区部分原油样品和志丹地区III类原油样品的单体烃碳同位素组成相对偏轻一些。

油与烃源岩的单体烃碳同位素对比(图11、12)显示,长7油页岩的正构烷烃碳同位素组成与原油相近或偏重 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$,对比关系为好。长7黑色泥

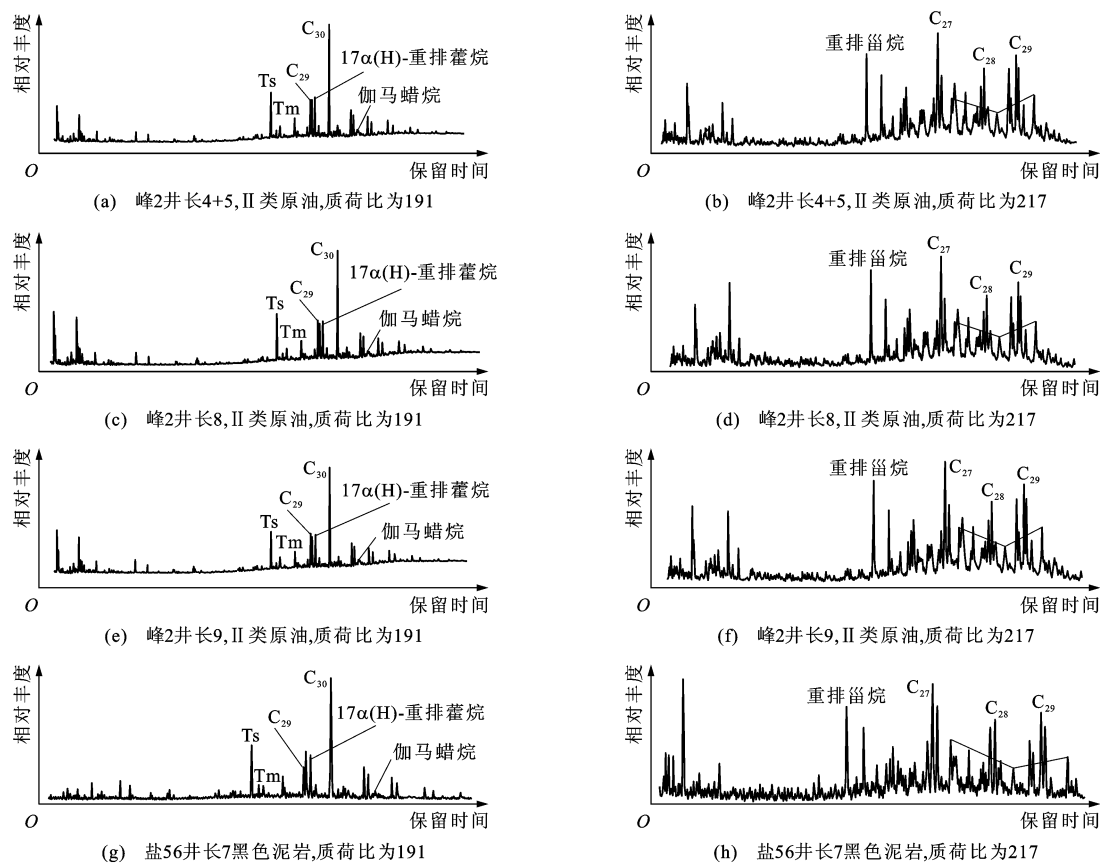


图10 峰2井不同产层原油与长7烃源岩的甾烷、萜烷质量色谱

Fig. 10 Mass Chromatograms of Sterane and Terpane of Oils from Different Layers and Source Rocks of Chang-7 in Well Feng2

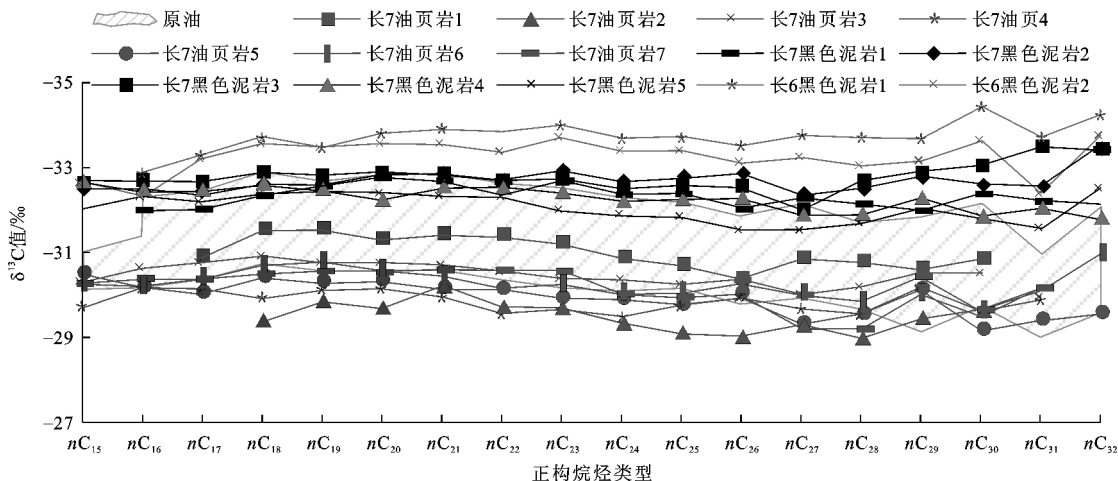


图 11 长 6、长 7 湖相烃源岩与原油的正构烷烃系列碳同位素组成对比

Fig. 11 Comparison of Carbon Isotopic Compositions of *n*-alkane Series from Chang 6, Chang 7 Lacustrine Source Rocks and Oils

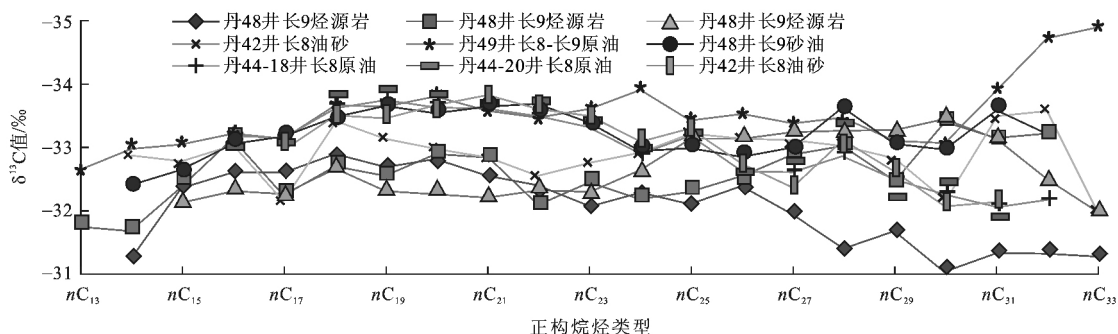


图 12 志丹地区长 8、长 9 原油与长 9₁ 烃源岩的单体烃碳同位素组成对比

Fig. 12 Comparison of Carbon Isotopic Compositions of Monomer Hydrocarbon from Chang-8, Chang-9 Oils and Chang-9₁ Source Rocks in Zhidan Area

岩的正构烷烃碳同位素组成与原油相近或稍偏轻,对比关系为好一较好。长 6 黑色泥岩的正构烷烃碳同位素组成要比原油轻,两者的对比关系差。陕北志丹地区长 8、长 9 原油与长 9₁ 黑色泥页岩的正构烷烃碳同位素相近,与生物标志物的对比结果相一致,进一步佐证了两者之间良好的亲缘关系。

4 结 语

(1)鄂尔多斯盆地中生界原油属典型的淡水—微咸水湖相油型油,鉴于原油之间 C₃₀* 相对丰度存在明显的差异性与规律性,并且 C₃₀* 相对丰度的变化与重排甾烷、C₂₉ Ts、Ts 等具有良好的关联性。因而,以 C₃₀* 相对丰度为主要依据,可将中生界湖相油型油细分为异常高的 C₃₀* 相对丰度、较高—高的 C₃₀* 相对丰度和低 C₃₀* 相对丰度等 3 类。

(2)以 C₃₀* 相对丰度为主要依据,进行油岩的甾烷、萜烷生物标志物的分布特征及相关参数、单体烃碳同位素组成等的对比。结合烃源岩的发育分布特

征、成藏组合特征的综合分析,确定长 7 油页岩是盆地中生界的主力烃源岩。长 7、长 9 黑色泥岩总体上属次要烃源岩,在其最发育的地区和特定的成藏组合则可能成为重要的(或主力)油源岩,如陕北姬塬地区西北部的长 7 黑色泥岩、志丹地区长 8 和长 9 成藏组合的长 9₁ 黑色泥岩。长 6、长 8 暗色泥岩对油源的贡献较为有限。因此,中生界的油源供给具有“—源主导、多源参与”的显著特征。

原油、烃源岩 GC-MS、GC-IRMS 分析由中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室、中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心、中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院分析试验中心完成,在此一并感谢!

参 考 文 献 :

References :

[1] 李荣西,段立志,张少妮,等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2011,33(4):364-372.

- LI Rong-xi, DUAN Li-zhi, ZHANG Shao-ni, et al. Review on Oil/Gas Accumulation with Low Permeability in Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(4): 364-372.
- [2] 陈安定. 陕甘宁盆地中生界生油层特征[M]//《中国含油气盆地烃源岩评价》编委会. 中国含油气盆地烃源岩评价. 北京: 石油工业出版社, 1989: 421-437.
CHEN An-ding. Characteristics of Mesozoic Source Rocks in Ordos Basin[M]// Editorial Committee of *Evaluation on Source Rocks in Chinese Petroliiferous Basins*. Evaluation on Source Rocks of Chinese Petroliiferous Basins. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 421-437.
- [3] 张文正, 关德师. 液态烃分子系列碳同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
ZHANG Wen-zheng, GUAN De-shi. Carbon Isotope Geochemistry of Liquid Hydrocarbon Molecular Series [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [4] 张文正, 鲁川莉. 烃源岩残留沥青中正构烷烃分子的碳同位素研究[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 212-215, 225.
ZHANG Wen-zheng, ZAN Chuan-li. Carbon Isotope Research on *n*-alkane Elements of Asphaltic Residues in Hydrocarbon Source Rock[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 212-215, 225.
- [5] 陈建平, 黄第藩. 鄂尔多斯盆地东南缘煤矿侏罗系原油油源[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 100-104.
CHEN Jian-ping, HUANG Di-fan. Oil/Source Correlation of Crude Oils from the Coal Mines in the Southeast of the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 100-104.
- [6] 段毅, 吴保祥, 张辉, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油地球化学特征及其成因[J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 301-310.
DUAN Yi, WU Bao-xiang, ZHANG Hui, et al. Geochemistry and Genesis of Crude Oils of the Xifeng Oilfield in the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 301-310.
- [7] 张文正, 李剑峰. 鄂尔多斯盆地油气源研究[J]. *中国石油勘探*, 2001, 6(4): 28-36.
ZHANG Wen-zheng, LI Jian-feng. Study on Oil and Gas Sources in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(4): 28-36.
- [8] 郭艳琴, 李文厚, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地安塞—富县地区延长组—延安组原油地球化学特征及油源对比[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(2): 218-224.
GUO Yan-qin, LI Wen-hou, CHEN Quan-hong, et al. Geochemical Behaviors of Oil and Oil-source Correlation in Yanchang-Yan'an Formations in Ansai-Fuxian Area, Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2006, 27(2): 218-224.
- [9] 侯林慧, 彭平安, 于赤灵, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬—西峰地区原油地球化学特征及油源分析[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 497-506.
HOU Lin-hui, PENG Ping-an, YU Chi-ling, et al. Geochemical Characteristics and Oil-source Analysis of Crude Oils in Jiyuan-Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 497-506.
- [10] 郑荣才, 牛小兵, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田延长组原油性质与来源分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 142-145.
ZHENG Rong-cai, NIU Xiao-bing, LIANG Xiao-wei, et al. Study on the Property and Origin of Crude Oil of Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 142-145.
- [11] 张云霞, 陈纯芳, 宋艳波, 等. 鄂尔多斯盆地南部中生界烃源岩特征及油源对比[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 173-177.
ZHANG Yun-xia, CHEN Chun-fang, SONG Yan-bo, et al. Features of Mesozoic Source Rocks and Oil-source Correlation in Southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(2): 173-177.
- [12] 赵彦德, 罗安湘, 孙柏年, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘三叠系烃源岩评价及油源对比[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(3): 1-6, 13.
ZHAO Yan-de, LUO An-xiang, SUN Bai-nian, et al. Hydrocarbon Source Evaluation and Oil Source Contrast of the Triassic System in Southwest Margin Ordos Basin[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2012, 48(3): 1-6, 13.
- [13] 赵彦德, 刘显阳, 张雪峰, 等. 鄂尔多斯盆地天环坳陷南段侏罗系原油油源分析[J]. *现代地质*, 2011, 25(1): 85-93.
ZHAO Yan-de, LIU Xian-yang, ZHANG Xue-feng, et al. Oil Sources Analysis of the Jurassic Crude Oil in the Southern Tianhuan Depression, Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2011, 25(1): 85-93.
- [14] 张海林, 邓南涛, 张枝焕, 等. 鄂尔多斯盆地南部中生界原油地球化学特征及油源分析[J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2): 309-316.
ZHANG Hai-lin, DENG Nan-tao, ZHANG Zhi-huan, et al. Geochemical Characteristics and Oil-source Correlation of the Mesozoic Crude Oils in the Southern Ordos Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20(2): 309-316.
- [15] 邓南涛, 张枝焕, 王付斌, 等. 鄂尔多斯盆地南部镇泾

- 地区中生界原油地球化学特征及油源分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 604-611.
- DENG Nan-tao, ZHANG Zhi-huan, WANG Fu-bin, et al. Geochemical Characteristics and Oil-source Correlation of Crude Oils in the Zhenjing Area, Southern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 604-611.
- [16] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
- YANG Hua, ZHANG Wen-zheng. Leading Effect of the Seventh Member High-quality Source Rock of Yanchang Formation in Ordos Basin During the Enrichment of Low-penetrating Oil-gas Accumulation: Geology and Geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [17] 张文正, 杨华, 傅锁堂, 等. 鄂尔多斯盆地长9₁湖相优质烃源岩的发育机制探讨[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2007, 37(增1): 33-38.
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, FU Suo-tang, et al. On the Development Mechanism of the Lacustrine High-grade Hydrocarbon Source Rocks of Chang-9₁ Member in Ordos Basin [J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2007, 37(S1): 33-38.
- [18] 杨华, 张文正, 刘显阳, 等. 优质烃源岩在鄂尔多斯低渗透富油盆地形成中的关键作用[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 1-9.
- YANG Hua, ZHANG Wen-zheng, LIU Xian-yang, et al. Key Role of High-quality Source Rocks on the Formation of Low-permeability Oil-rich Reservoirs in Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 1-9.
- [19] 张文正, 杨华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地延长组长9₁湖相优质烃源岩的成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 557-562.
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, LI Shan-peng. Hydrocarbon Accumulation Significance of Chang-9₁ High-quality Lacustrine Source Rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 557-562.
- [20] 张文正, 杨华, 侯林慧, 等. 鄂尔多斯盆地延长组不同烃源岩 17 α (H)-重排藿烷的分布及其地质意义[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2009, 39(10): 1438-1445.
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, HOU Lin-hui, et al. Distribution and Geological Significance of 17 α (H)-diahopanes from Different Hydrocarbon Source Rocks of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2009, 39(10): 1438-1445.
- [21] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. Englewood: Prentice Hall, 1993.
- [22] PHILIP R P, GILBERT T D. Biomarker Distributions in Australian Oils Predominantly Derived from Terrigenous Source Material [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/2/3): 73-84.
- [23] 赵孟军, 张水昌. 17 α (H)-重排藿烷在塔里木盆地中的指相意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 36-38.
- ZHAO Meng-jun, ZHANG Shui-chang. The Special Sedimentary Facies Indicated by 17 α (H)-diahopanes in Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 36-38.
- [24] 朱扬明, 钟荣春, 蔡勋育, 等. 川中侏罗系原油重排藿烷类化合物的组成及成因探讨[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 253-260.
- ZHU Yang-ming, ZHONG Rong-chun, CAI Xun-yu, et al. Composition and Origin Approach of Rearranged Hopanes in Jurassic Oils of Central Sichuan Basin [J]. Geochimica, 2007, 36(3): 253-260.
- [25] 李红磊, 张敏, 姜连, 等. 利用芳烃参数研究煤系烃源岩中重排藿烷成因[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 191-199.
- LI Hong-lei, ZHANG Min, JIANG Lian, et al. Application of Aromatics on Genesis of Rearranged Hopanes in Coal-bearing Source Rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(1): 191-199.
- [26] 王春江, 傅家谟, 盛国英, 等. 18 α (H)-新藿烷及 17 α (H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1366-1372.
- WANG Chun-jiang, FU Jia-mo, SHENG Guo-ying, et al. Geochemical Characteristics and Applications of 18 α (H)-neohopanes and 17 α (H)-diahopanes [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(13): 1366-1372.
- [27] 张文正, 裴戈, 关德师. 液态正构烷烃系列、姥鲛烷、植烷碳同位素初步研究[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(5): 32-41.
- ZHANG Wen-zheng, PEI Ge, GUAN De-shi. A Primary Study on Carbon Isotope of *n*-Alkane, Pristane and Phytane in Crude Oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 1992, 19(5): 32-41.