

# 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系 露头沥青地球化学特征与意义

金晓辉<sup>1</sup> 孙润轩<sup>2</sup> 陈霞<sup>1</sup> 孙宜朴<sup>1</sup> 张军涛<sup>1</sup> 李淑筠<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油大学 地球科学学院 北京 102249)

**摘要:** 鄂尔多斯盆地南缘露头沥青赋存于下奥陶统亮甲山组灰岩裂缝中, 裂缝近垂直于层面, 沥青高约 75 m, 宽约 1~44 cm, 下宽上窄。其沥青质的碳同位素为  $-28\text{‰}$ , 沥青等效反射率分布在 1.829%~1.965% 之间; 沥青和上奥陶统背锅山组烃源岩均具有较低的 Pr/Ph 值、较高的  $C_{24}$  四环萜烷的生物标志物, 沥青的  $C_{29}$  甾烷优势和低伽马蜡烷指数可能揭示其成烃母质形成于微咸水的低等海洋浮游生物的环境。沥青和背锅山组烃源岩规则甾烷组成均有“V”型特征,  $C_{24}$  四环萜烷/ $C_{26}$  三环萜烷、Tm/Ts 值萜烷生物标志物参数值接近, 表示他们具有亲缘关系。南缘奥陶系沥青地球化学特征及成因研究, 对评价南缘下古生界碳酸盐岩的勘探潜力具有重要的理论和生产价值。

**关键词:** 露头沥青; 生物标志物; 地球化学特征; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地南部

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

## Geochemical characteristics and significance of bitumen of Ordovician outcrops at the southern margin of Ordos Basin

Jin Xiaohui<sup>1</sup>, Sun Runxuan<sup>2</sup>, Chen Xia<sup>1</sup>, Sun Yipu<sup>1</sup>, Zhang Juntao<sup>1</sup>, Li Shujun<sup>1</sup>

(1. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Outcrop bitumen occurs in the limestone cracks in the Lower Ordovician Liangjiashan Formation at the southern margin of Ordos Basin. The cracks are nearly vertical. The bitumen zone is about 75 m high and 1–44 cm wide, and is wide at the bottom and narrow on the top. The carbon isotope value of the bitumen is  $-28\text{‰}$ . Equivalent bitumen vitrinite reflectance ranges from 1.829%–1.965%. The bitumen and the source rocks in the Upper Ordovician Beiguoshan Formation have low Pr/Ph values and high  $C_{24}$  tetracyclic terpane biomarker concentrations. Bitumen samples with  $C_{29}$  sterane predominance and low gammacerane index reveal that hydrocarbon parent materials were formed in a low-brackish water environment from marine plankton. The composition of steroids is “V” type, and the biomarkers such as  $C_{24}$  tetracyclic terpanes/ $C_{26}$  tricyclic terpanes and Tm/Ts are similar, indicating a genetic relationship. The geochemical characteristics and significance of bitumen of the Ordovician outcrops at the southern margin of Ordos Basin have helpful for the evaluation of the Lower Paleozoic carbonate source rocks.

**Key words:** outcrop bitumen; biomarker; geochemical feature; Ordovician; southern margin of Ordos Basin

鄂尔多斯盆地奥陶系是重要的工业油气流层位<sup>[1-2]</sup>, 目前已探明开发了中部靖边奥陶系天然气田, 大牛地气田奥陶系也获得工业油气流发现。盆地南缘早古生代位于鄂尔多斯台地与古秦岭洋之间, 广泛分布着沉积厚度大、沉积类型多样的下古生界海相碳酸盐岩地层, 特别是发育的斜坡相中奥陶统平凉组和晚奥陶统背锅山组暗色泥岩, 成为下古生界海相碳酸盐岩地层中的优质烃源岩<sup>[3]</sup>; 同

时, 寒武系鲕粒灰岩、奥陶系厚层灰岩以及礁滩灰岩、白云岩为储层的形成提供了条件。盆地南部的永参 1、耀参 1、宜 2 井等在奥陶系礁滩相地层中也有丰富的沥青发现<sup>[4]</sup>。目前关于鄂尔多斯盆地奥陶系气藏烃源岩的认识还存较多分歧<sup>[5-7]</sup>。本文在对鄂尔多斯盆地南缘礼泉东庄剖面奥陶系露头沥青(此前这一地区周缘奥陶系地质露头未见有沥青或油气苗发现的报道)地球化学特征分析的基

收稿日期: 2016-05-08; 修订日期: 2016-08-03。

作者简介: 金晓辉(1964—)男, 博士, 教授级高级工程师, 从事油气地质与区带评价研究。E-mail: jinxh\_syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05005)和中国石化科技部项目(2014P1067)资助。

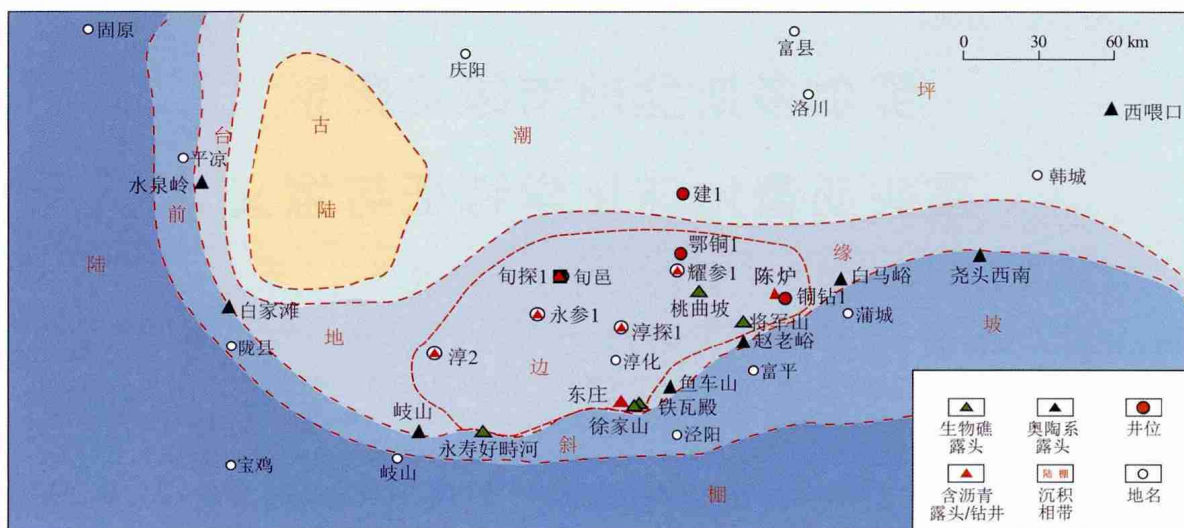


图 1 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系重点探井与露头位置

Fig. 1 Key wells and Ordovician outcrops at the southern margin of Ordos Basin

基础上 结合该剖面的烃源岩和临近探井样品的地球化学特征研究 探讨了沥青的成因以及对鄂南奥陶系油气勘探潜力认识的地质意义。

### 1 样品与实验

沥青和烃源岩样品主要来自鄂尔多斯盆地南缘礼泉东庄奥陶系剖面(图 1)。沥青赋存于下奥陶统亮甲山组地层裂缝中,裂缝与层面斜交,下宽上窄,沥青高约 75 m,宽约 1~44 cm。该剖面下部上奥陶统背锅山组为一套深灰色、黑灰色含粉砂质、钙质的页岩,赋存沥青的亮甲山组逆冲、不整合于背锅山组之上(图 2)。背锅山组页岩厚度约 200 m,上部以深灰色、钙质的页岩为主,中部为黑色页岩夹透镜状灰岩,下部为黑色页岩,含疑源类化石,是目前鄂尔多斯盆地南部出露较全的可能烃源岩层系。

样品抽提和分离按《SY/T 5118-2005 岩石中氯仿沥青的测定方法》,以氯仿为溶剂,恒温下索氏抽提器中连续抽提 72 h,用石油醚冲洗得到饱和烃,用二氯甲烷冲洗得到芳烃,用乙醚冲洗得到非

烃。气相色谱仪器为 Agilent7890 气相色谱仪,色谱柱为 DB-5MS,载气为 He,柱内流速 0.8 mL/min,分流比 1:70,柱温初温 80℃,恒温 1 min 后,以 3℃/min 升至 230℃,2℃/min 升至 310℃,恒温 15 min,检测器/进样温度均为 290℃,每次进样速度与与方法完全相同。

GC/MS 鉴定使用 Agilent 5973i 型色谱质谱联用仪,同时选用与色谱分析时同样的色谱柱和色谱条件,离子源类型为 EI。镜质体反射率应用 MPV-III 显微光度计 806(5) 仪测试,GC 和 GC/MS 定性鉴定实验分析工作在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心进行。

### 2 族组分同位素与色谱特征

由于沥青样品的沥青“A”抽提量极少,采用薄层色谱技术测试了不同族组分的碳同位素值,沥青“A”和沥青质的  $\delta^{13}C$  为  $-28\text{‰}$ ,其族组分饱和烃、芳烃和非烃的  $\delta^{13}C$  分别为  $-28.1\text{‰}$ ,  $-27.3\text{‰}$ ,  $-27.4\text{‰}$ ,说明沥青质碳同位素较轻,可能来源于低等海洋浮游生物的环境;沥青演化程度较高,其等效镜煤反射率( $R_o$ )分布在 1.829%~1.965% 之间。

五环类异戊二烯烃是石油地化研究中基本的生物标志物。沥青样品的饱和烃色谱曲线具有典型的前峰碳分布特征(图 3)。主峰碳数为  $C_{18}$ ,奇偶优势不明显,OEI 值为 0.85,具有一定的植烷优势,姥鲛烷与植烷比值为 0.544,姥鲛烷与正十七烷比值为 0.808,植烷与正十八烷比值为 1.002(表 1)。露头沥青样品的色谱参数介于奥陶系凝析油与东庄组(相当于背锅山组)烃源岩样品之间,其 Pr/Ph 参数远比上古生界凝析油小。长链的不

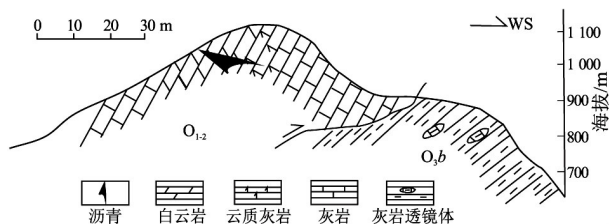


图 2 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系露头剖面位置见图 1 东庄露头。

Fig. 2 Geological profile of the Ordovician at the southern margin of Ordos Basin

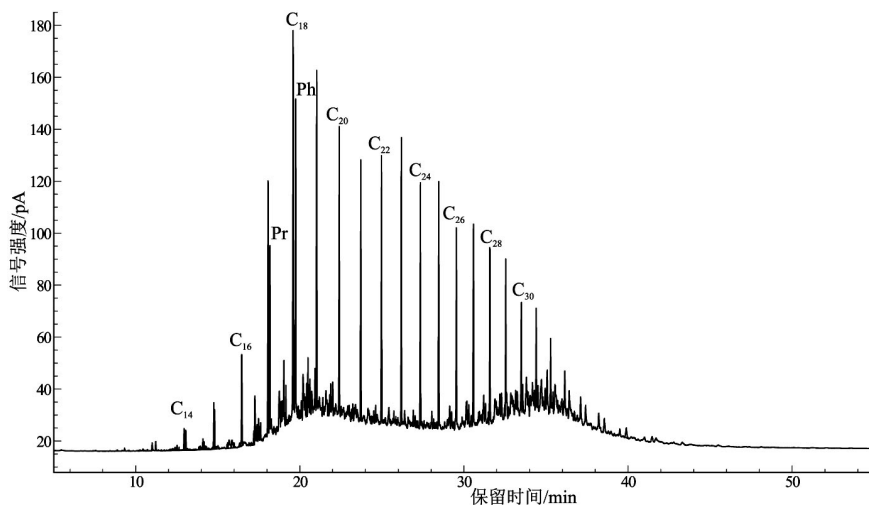


图 3 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系露头沥青样品抽提物的饱和烃色谱

Fig. 3 Gas chromatogram of saturated hydrocarbon in extracts from outcrop bitumen sampled from the southern margin of Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地沥青、烃源岩样品的饱和烃色谱参数

Table 1 Gas chromatogram parameters of saturated hydrocarbon in bitumen and source rock samples from Ordos Basin

样品号	层位	主峰碳	OEP	Pr/C <sub>17</sub>	Ph/C <sub>18</sub>	Pr/Ph	样品性质
LQ	亮甲山组(O <sub>1</sub> l)	C <sub>18</sub>	0.865	0.808	1.002	0.544	沥青
DZH-1	背锅山组(O <sub>3</sub> b)	C <sub>17</sub>	1.453	0.817	1.245	0.954	烃源岩
DZH-2	背锅山组(O <sub>3</sub> b)	C <sub>25</sub>	1.132	1.532	2.120	0.930	烃源岩
DZH-22	背锅山组(O <sub>3</sub> b)	C <sub>25</sub>	1.066	0.912	1.217	0.983	烃源岩
PL-8	平凉组(O <sub>2</sub> p)	C <sub>17</sub>	1.047	0.307	0.168	1.967	烃源岩
PL-2	平凉组(O <sub>2</sub> p)	C <sub>17</sub>	1.059	0.268	0.148	1.858	烃源岩
麒参 1	奥陶系			0.090	0.070	1.790	凝析油
洲 1	石炭系			高	低	2.470	凝析油
凝析油	石炭系			高	低	3.04~4.07	凝析油

注:麒参 1、洲 1 样品数据引自文献[11],其余样品为本次采样分析。

规则类异戊二烯烃的存在是古细菌生源的标志<sup>[8-9]</sup>, Pr/Ph>3 可能揭示较氧化条件下的陆源输入, Pr/Ph<3 为海相有机质的特征,如塔里木盆地海相原油<sup>[10]</sup> Pr/Ph<1.3,因此,沥青样品的饱和烃色谱具有海相油气成因的特征。

### 3 生物标志物特征与对比

#### 3.1 生物标志物特征及其地质意义

奥陶系露头沥青样品的生物标志物中孕甾烷较丰富, C<sub>27-29</sub> 甾烷为典型“V”型分布(图 4), 萜烷系中三环萜烷系较丰富, C<sub>24</sub> 四环萜烷含量较高; 藿烷系列中具有较高的 C<sub>30</sub>- $\gamma$  蜡烷和莫烷。C<sub>24</sub> 四环萜烷和 C<sub>26</sub> 三环萜烷往往是原油和烃源岩中的优势成分,在碳酸盐岩地层中, C<sub>24</sub> 四环萜烷丰度比碎屑岩样品高。四环萜烷是由五环的藿烷类三萜烷降解形成,细菌是它们的生源。因此, C<sub>24</sub> 四环萜烷可能是碳酸盐岩沉积环境的标志性化合物<sup>[12]</sup>,这与

目前认识的鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩形成的环境一致,即盆地南缘奥陶系碳酸盐岩为有利于形成烃源岩的斜坡相沉积环境。 $\gamma$  蜡烷的前身被认为是四膜虫醇,来自一种原生动植物。大量的  $\gamma$  蜡烷出现指示烃源岩的沉积环境为强还原和超盐度,或者是来自碳酸盐岩和蒸发岩的海相环境,煤系地层一般不含或含量极微;莫烷( $\beta\alpha$ -藿烷)含量极低,莫烷与 C<sub>30</sub>H(17 $\alpha$ (H)-藿烷)之比为 0.16。一般富含陆相有机质的煤和泥岩相对富集莫烷<sup>[13]</sup>,海相有机质莫烷含量低,因此,该样品甾烷和萜烷系列生物标志物具有海相原油的成因特征。

#### 3.2 生物标志物特征对比

该露头剖面深灰色、黑灰色含粉砂质、钙质的页岩是目前认为鄂尔多斯盆地海相的主要烃源岩层。采集的背锅山组烃源岩样品也在同样的条件下进行饱和烃的质谱分析(图 4),沥青和背锅山组烃源岩甾烷、萜烷的生物标志物及其特征参数见表 2。

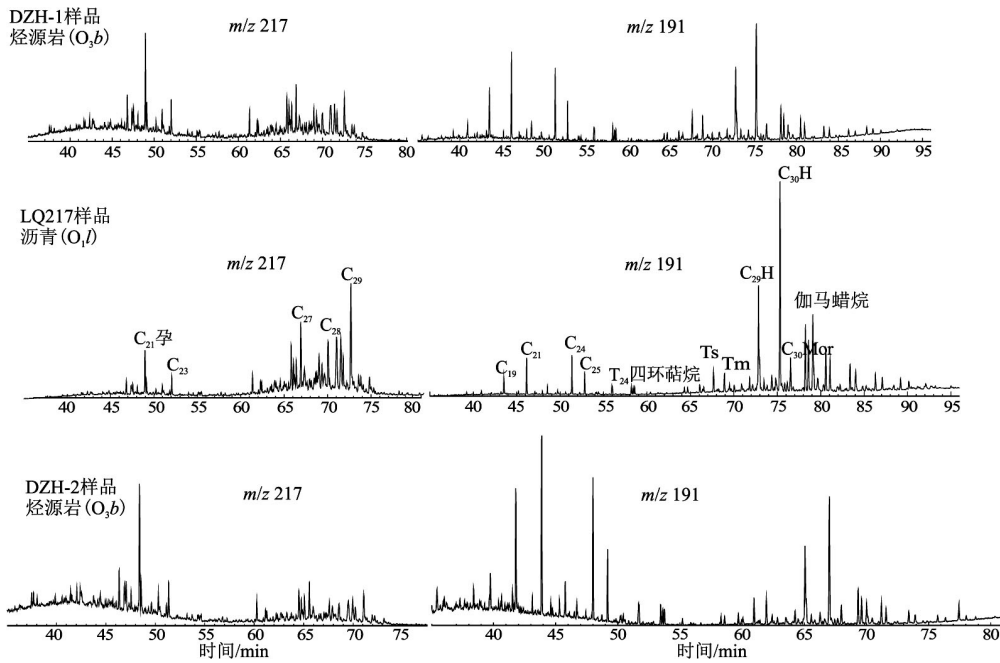


图 4 鄂尔多斯盆地南缘露头沥青与烃源岩饱和烃的甾烷、萜烷系列对比  
 Fig. 4 GC-MS mass chromatograms of saturated hydrocarbon in outerop bitumen and source rocks collected at the southern margin of Ordos Basin

表 2 研究区样品的甾烷、萜烷生标参数对比

Table 2 Biomarkers of sterane and terpane of samples collected at the southern margin of Ordos Basin

样号	岩性	层段	$\alpha\alpha\alpha$ 甾烷 $C_{29} S / (S+R)$	$C_{29}$ 甾烷 $\beta\beta / (\alpha\alpha+\beta\beta)$	$\alpha\alpha\alpha R$ $C_{28} / C_{29}$	$\alpha\alpha R$ $C_{27} / C_{29}$	Tm/ Ts	伽马蜡烷/ $C_{30} H$	$C_{29}$ 莫烷/ $C_{30}$ 藿烷	$C_{32}$ 藿烷 S/R
DZH	沥青	亮甲山组	0.37	0.35	0.45	0.21	0.93	0.41	0.160	1.32
DZH-1	深灰、黑色色页岩	平凉组	0.48	0.40	0.67	1.00	0.97	0.14	0.150	1.35
DZH-2	深灰、黑色色页岩	平凉组	0.45	0.40	0.66	1.02	1.07	0.16	0.160	1.37
FG1-1	深灰色白云质泥岩	马四	0.57	0.39	0.77	1.02	0.76	0.15	0.120	1.45
FG6-1	灰黑色白云质泥岩	马五 <sub>4</sub>	0.49	0.36	0.66	0.80	0.95	0.24	0.015	1.46
FG4-5	深灰色白云质泥岩	马五 <sub>1</sub>	0.54	0.37	0.69	0.89	0.77	0.17	0.140	1.47

注: FG1、FG6 和 FG4 井的数据引自文献[14]。

### 3.2.1 孕甾烷系列

亮甲山组沥青和背锅山组烃源岩中都有丰富的孕甾烷系列,以  $C_{21}\alpha\beta$  孕甾烷高含量为特征。沥青与 2 个烃源岩样品孕甾烷/规则甾烷值分别为 0.06、0.21、0.37, 沥青样品相对较低,这可能与油气的运移演化过程有关,随着成熟度增加孕甾烷降低、规则甾烷含量升高。

### 3.2.2 重排甾烷与甾烷系列

沥青与 2 个烃源岩样品重排甾烷/规则甾烷值分别为 0.2、0.33、0.31。重排甾烷源自重排甾烯,通常其较低的比值指示烃源岩为海相环境的沉积。规则甾烷组成均有“V”型特征,但是沥青规则甾烷组成具有  $C_{28} < C_{27} < C_{29}$  的特征,背锅山组烃源岩规则甾烷具有  $C_{28} < C_{29} < C_{27}$  的特征。 $C_{27}$  甾烷的优势指示海洋浮游植物的优势<sup>[15]</sup>。沥青甾烷  $C_{29}\beta\beta / (\alpha\alpha+\beta\beta)$  和  $C_{29}\alpha\alpha 20S / (S+R)$  分别达 0.35 和 0.37,揭示其

成熟度中等,这与沥青的等效镜煤反射率平均值为 1.85% 表现为中等成熟度相一致。

### 3.2.3 三环萜烷和四环萜烷系列

三环萜烷系列在烃源岩和沥青样品中含量较为丰富(图 4) 特别是在饱和烃馏分 RIC 图上,烃源岩样品中三环萜烷系列明显优势于藿烷系列,生物标志化合物  $C_{21}$ 、 $C_{23}$  含量较高,沥青和 2 个烃源岩样品中三环萜烷/五环萜烷分别为 0.15、0.53、0.9,  $C_{21} / C_{23}$  分别为 0.9、1.19、1.36,  $C_{19-21} / C_{23-25}$  分别为 0.76、1.16、1.49。四环萜烷系列中主要指示海相碳酸盐岩环境的  $C_{24}$  四环萜烷含量较高,沥青和 2 个烃源岩样品的  $C_{24}$  四环萜烷/ $C_{26}$  三环萜烷比较接近,分别为 0.59、0.69、0.65。较高  $C_{24}$  四环萜烷/ $C_{26}$  三环萜烷的相对含量指示了碳酸盐岩源岩的特点。

### 3.2.4 藿烷系列

藿烷系列在所有样品中分布相似,均检测到较

丰富的伽马蜡烷值。值得注意的是沥青和2个烃源岩样品中的伽马蜡烷指数分别为0.41、0.14、0.16。沥青样品中伽马蜡烷比 $C_{31}$ 藿烷丰富,具有鲜明的海相碳酸盐岩成因原油的特征; $T_m/T_s$ 值相近,分别为0.93、0.97、1.07,其参数值与富县地区井下马家沟组烃源岩样品接近,具有相似的成熟度; $C_{29}$ 莫烷/ $C_{30}$ 藿烷分别为0.16、0.15、0.16(表2); $C_{32}$ 藿烷 $S/R$ 分别为0.32、1.35、1.37。

在上述甾、萜烷的生物标志物指标参数中,除了沥青的 $\alpha\alpha R$   $C_{27}/C_{29}$ (最低)和伽马蜡烷指数(最高)与烃源岩样品有一定的差异外,其他指标值均相近。对沥青样品来讲, $C_{29}$ 甾烷的优势和低伽马蜡烷指数可能揭示其成烃母质形成于具有一定微咸水的低等海洋浮游生物的环境,其与烃源岩样品的差异可能与鄂尔多斯盆地南缘古生代盆地斜坡边缘环境沉积微相的变化有关。从盆地南缘出露的碳酸盐岩地层分布看,从西部的好寺河、铁瓦殿到东部的赵老峪、将军山和桃曲坡露头剖面,出露地层的生物组成、地层岩性组成和结构都有较大的变化,佐证与其共生烃源岩的环境有一定差异。

#### 4 结论

亮甲山组露头沥青、背锅山组烃源岩以及邻区探井油气样品的生物标志化合物、组分碳同位素均具有海相环境烃源岩的特征;盆地南缘的沥青和油气显示来源于平凉组、背锅山组烃源岩的生烃贡献,说明鄂尔多斯盆地南缘下古生界具有油气成藏的基本条件;盆地西南缘的秦岭海槽北斜坡碳酸盐岩地层具有一定的勘探潜力,是潜在的勘探领域。

#### 参考文献:

- [1] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.  
Yang Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [2] 杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740.  
Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(5): 733-740.
- [3] 孙宜扑, 王传刚, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统平凉组烃源岩地球化学特征及勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 162-168.  
Sun Yipu, Wang Chuangang, Wan Yi, et al. Geochemistry characteristics and exploration potential of Middle Ordovician Pingliang Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(2): 162-168.
- [4] 张春林, 孙粉锦, 刘锐娥, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系沥青及古油藏生气潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 668-673.  
Zhang Chunlin, Sun Fenjin, Liu Rui'e, et al. Bitumen and hydrocarbon generation potential of paleo-reservoirs in the Ordovician, south Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 668-673.
- [5] 谢增业, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩有效性判识[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 29-32.  
Xie Zengye, Hu Guoyi, Li Jian, et al. A study on validity identification of source rock by new experimental techniques for Ordovician in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 29-32.
- [6] 戴金星. 中国煤成大气田及气源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 28-104.  
Dai Jinxing. Large gas field of coal-formed gas and gas source[M]. Beijing: Science Press, 2014: 28-104.
- [7] 戴金星, 夏新宇. 长庆气田奥陶系风化壳气藏、气源研究[J]. 地质前缘, 1999, 6(S1): 195-202.  
Dai Jinxing, Xia Xinyu, Research on source rock correlation of the Ordovician reservoir, Changqing gasfield[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(S1): 195-202.
- [8] Peters K E, Moldowan J M, Driscoll A R, et al. Origin of beatrice oil by co-sourcing from Devonian and Middle Jurassic source rocks, Inner Moray Firth, United Kingdom[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(4): 454-471.
- [9] Peter K E, Moldowan J M. The biomarker guide[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 1993.
- [10] 王铁冠. 我国一些地区原油与生油岩中某些沉积环境生物标志物初探[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1980: 99-115.  
Wang Tieguan. The crude oil and source rocks in some regions of our country in some biomarkers of sedimentary environment[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1980: 99-115.
- [11] 翟光明. 中国石油地质志 卷十二: 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 203-210.  
Zhai Guangming. Chinese petroleum geology vol. 12: Changqing oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 203-210.
- [12] Palacas J G. Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks[M]. Tulsa, OK: AAPG, 1984: 102-110.
- [13] Moldowan J M, Lee C Y, Watt D S, et al. Analysis and occurrence of  $C_{26}$ -steranes in petroleum and source rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(4): 1065-1081.
- [14] 朱建辉, 吕虹虹, 缪九军, 等. 鄂尔多斯西南缘下古生界烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 662-670.  
Zhu Jianhui, Lü Jianlong, Miao Jiujun, et al. Hydrocarbon generation potential of Lower Paleozoic source rocks in southwestern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(6): 662-670.
- [15] Huang W Y, Meinschen W G. Sterols in sediments from Baffin Bay, Texas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1978, 42(9): 1391-1396.

(编辑 徐文明)