

文章编号:1001-6112(2012)01-0078-06

## 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1井油源对比

魏分粮<sup>1</sup>, 欧阳睿<sup>2</sup>, 肖斌<sup>2</sup>, 钟宁宁<sup>3</sup>, 罗情勇<sup>3</sup>,  
韩辉<sup>3</sup>, 齐琳<sup>3</sup>, 付晓宁<sup>2</sup>, 张毅<sup>4</sup>

(1. 中国石化中原油田分公司内蒙勘探开发指挥部, 河南濮阳 457001;

2. 中国石化中原油田分公司物探研究院, 河南濮阳 457001; 3. 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; 4. 中国石化中原油田分公司采油四厂, 河南濮阳 457001)

**摘要:**二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1井侏罗系阿拉坦合力群烃源岩的 $R_o$ 分布范围为0.58%~0.67%,平均值为0.63%, $T_{max}$ 平均值大于435℃,处于低熟—成熟生烃演化阶段;Pr/Ph分布范围为0.39~5.24,平均值为1.62,表明其沉积环境为偏还原;伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷分布范围为0.07~1.45,平均值为0.37,表明其沉积于淡水—微咸水的湖沼; $C_{29}/C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷比值均大于1,表明烃源岩生源既有低等生物贡献又有高等植物贡献,且高等植物贡献占优势。通过烃源岩和原油的地球化学特征对比,表明准宝1井原油来自阿拉坦合力群烃源岩。阿拉坦合力群是二连盆地有利的油气勘探方向。

**关键词:**生物标记化合物;地球化学特征;油源对比;侏罗系;格日勒敖都凹陷;二连盆地

中图分类号:TE122.1<sup>+</sup>14

文献标识码:A

### Correlation of oil and source in well Zhunbao 1, Gerileaodou Sag, Erlian Basin

Wei Fenliang<sup>1</sup>, Ouyang Rui<sup>2</sup>, Xiao Bin<sup>2</sup>, Zhong Ningning<sup>3</sup>, Luo Qingyong<sup>3</sup>,  
Han Hui<sup>3</sup>, Qi Lin<sup>3</sup>, Fu Xiaoning<sup>2</sup>, Zhang Yi<sup>4</sup>

(1. Exploration & Development Headquarter of Inner Mongolia, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China; 2. Geophysical Research Institute, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. No. 4 Oil Production Plant, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China)

**Abstract:** Source rocks of the Alatanheli Group of Jurassic in well Zhunbao 1 in the Gerileaodou Sag of the Erlian Basin have been studied.  $R_o$  ranges from 0.58% to 0.67% with the average value of 0.63% and  $T_{max}$  is over 435 °C in average, indicating low-mature and mature stages for hydrocarbon generation. Pr/Ph ranges from 0.39 to 5.24 and the average value is 1.62, indicating reducing environment. Gammacerane/ $C_{30}\alpha\beta$  hopane ranges from 0.07 to 1.45 with the average value of 0.37, proving that the source rocks deposited in lacustrine bog of sweet and brackish water.  $C_{29}/C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$  sterane is over 1, proving that the source rocks originated from both lower creature and advanced plant, and the advanced plant contributed more than the lower creature. Comparisons of geochemical features have been made between source rock and crude oil, indicating that the crude oil in well Zhunbao 1 originated from source rocks in the Alatanheli Group. The Alatanheli Group is the key exploration target in the Erlian Basin.

**Key words:** biomarker compound; geochemical feature; oil-source correlation; Jurassic; Gerileaodou Sag; Erlian Basin

### 1 地质概况

二连盆地位于内蒙古自治区东北部,是在海西期褶皱基底上发育起来的裂谷型断陷盆地<sup>[1-6]</sup>,可划分为五坳四隆9个构造单元<sup>[7]</sup>;盆内发育有45

个凹陷和21个凸起,这些凸起和凹陷相间排列,凹陷大小不等,形状各异,大部分走向为北东向<sup>[8]</sup>。格日勒敖都凹陷位于二连盆地的西南部、包饶断层的下降盘,面积约500 km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>;准宝1井是该凹陷包饶西构造—岩性圈闭上的一口预探井,主要钻遇

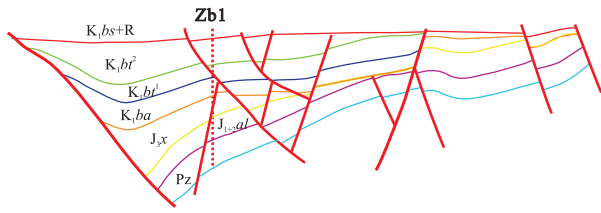


图 1 二连盆地格日勒敖都凹陷 ZB09-EW-66 测线构造剖面

Fig. 1 Tectonic profile along seismic line ZB09-EW-66 in Gerileadou Sag, Erlian Basin

的烃源岩为侏罗系和下白垩统,盖层为古近系、新近系和第四系,其中侏罗系由下到上包括阿拉坦合力群( $J_{1+2al}$ )和兴安岭群( $J_3x$ ),下白垩统由下到上包括阿尔善组( $K_1ba$ )、腾格尔组一段( $K_1bt^1$ )和二段( $K_1bt^2$ )、赛汉塔拉组( $K_1bs$ )。准宝 1 井侏罗系和下白垩统地层埋深浅,阿拉坦合力群底界深度为 3 219 m(图 1)。在准宝 1 井试油时仅在下侏罗统阿拉坦合力群见油,而在通常被认为是主力烃源岩的阿尔善组和腾格尔组<sup>[8-9]</sup>却未发现原油。前人对二连盆地油源进行了大量研究,如田福清<sup>[10]</sup>通过原油色谱—质谱图和生标参数对比发现巴音都兰凹陷阿尔善组原油主要来源于该组烃源岩,为该组自生油气;而对格日勒敖都凹陷的有效烃源岩知之甚少。本文通过生物标记化合物和稳定碳同位素<sup>[11-14]</sup>等探讨准宝 1 井已发现原油的地球化学特征和油源,为进一步勘探提供依据。

## 2 样品与实验

1 个原油样品(编号 ZB1-2596.4),产自准宝 1 井阿拉坦合力群,深度为 2 596.4 ~ 2 601 m;59 个岩屑样品和 8 个岩心样品,产自准宝 1 井腾二段、

腾一段、阿尔善组、兴安岭群和阿拉坦合力群。

样品的实验分析测试除镜质体反射率( $R_o$ )在胜利油田完成外,其余的由中国石油大学(北京)完成,包括:岩石热解分析、总有机碳测定、饱和烃和芳烃色谱—质谱(GC-MS)分析、原油物性和全油气相色谱(GC)分析。

## 3 烃源岩地球化学特征

### 3.1 烃源岩有机质丰度

腾二段、腾一段、阿尔善组和兴安岭群烃源岩样品有机质丰度都很低,每个层位的 TOC 均值均小于 0.6%, $S_1+S_2$  均值都远远小于 2 mg/g,氯仿沥青“ A ”均值均小于 0.05%,总烃均值远小于  $200 \times 10^{-6}$ (表 1),按照陆相烃源岩有机质丰度评价标准<sup>[15]</sup>,都划分为差烃源岩。阿拉坦合力群碳质泥岩总有机碳含量均值远大于 1%, $S_1+S_2$  均值远大于 6 mg/g,氯仿沥青“ A ”均值大于 0.1%,总烃均值达到  $400 \times 10^{-6}$ ,按照煤系泥岩有机质丰度评价标准<sup>[16]</sup>,达到好烃源岩标准;阿拉坦合力群暗色泥岩总有机碳含量均值为 0.9%, $S_1+S_2$  均值仅为 0.21 mg/g,氯仿沥青“ A ”均值仅为 0.04%,总烃均值为  $109.14 \times 10^{-6}$ ,按照陆相烃源岩有机质丰度评价标准<sup>[9]</sup>,达到较好烃源岩标准。

### 3.2 烃源岩有机质类型

阿拉坦合力群、兴安岭群、阿尔善组、腾一段和腾二段烃源岩有机质氢指数平均值基本都小于 150 mg/g(表 1),烃源岩有机质类型较差,而且结合图 2 可以看出,阿拉坦合力群、兴安岭群、阿尔善组和腾二段烃源岩有机质类型为  $II_2$ — $III$  型;腾一段烃源岩有机质类型为  $II_2$  型。

表 1 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝 1 井烃源岩有机质丰度和类型

Table 1 Organic matter abundance and type of source rocks in well Zhunbao 1, Gerileadou Sag, Erlian Basin

地层	TOC/%		$(S_1+S_2)/(mg \cdot g^{-1})$		氯仿沥青“ A ”/%		总烃/ $10^{-6}$		综合评价	$I_H/(mg \cdot g^{-1})$	
	分布特征	级别	分布特征	级别	分布特征	级别	分布特征	级别			
$K_1bt^2$	0.05 ~ 0.40 0.25(3)	差	0.03 ~ 0.49 0.16(12)	差	0.01 ~ 0.04 0.03(3)	较差	29.74 ~ 102.94 65.59(3)	差	差	43 ~ 701 150.58(12)	
$K_1bt^1$	0.19 ~ 0.72 0.43(3)	较差	0.1 ~ 1.75 0.57(8)	较差	0.01 ~ 0.06 0.04(3)	较差	34.44 ~ 188.01 97.96(3)	差	差	90 ~ 213 147.13(8)	
$K_1ba$	0.21 ~ 0.32 0.26(4)	差	0.09 ~ 0.54 0.21(10)	差	0.02 ~ 0.07 0.04(4)	较差	58.48 ~ 215.69 109.17(4)	较差	差	58 ~ 169 103.6(10)	
$J_3x$	0.12 ~ 0.33 0.24(4)	差	0.02 ~ 0.67 0.18(10)	差	0.01 ~ 0.05 0.03(4)	较差	57.94 ~ 138.42 97.26(4)	差	差	29 ~ 173 85.5(10)	
$J_{1+2al}$	碳质 泥岩	15 ~ 32.42 23.71(2)	好	2.36 ~ 86.37 44.59(4)	好	0.53 ~ 0.82 0.67(2)	好	245.7 ~ 624.56 435.14(2)	较好	好	20 ~ 332 113.17(12)
	暗色 泥岩	0.11 ~ 2.42 0.90(5)	较好	0.03 ~ 3.44 0.75(10)	较差	0.004 ~ 0.14 0.05(9)	较好	13.84 ~ 380.95 144.73(9)	较差	较好	

注:表中分式意义为  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{均值}(\text{样品数})}$ 。

### 3.3 烃源岩有机质成熟度

阿拉坦合力群烃源岩的  $R_o$  分布范围为0.58% ~ 0.67%, 平均值为0.63%,  $T_{max}$  平均值大于435 °C, 部分超过了455 °C (图2,3), 说明阿拉坦合力群烃源岩有机质处于低熟—成熟生烃演化阶段; 而兴安岭群、阿尔善组、腾一段和腾二段大部分烃源岩  $R_o$  都小于0.5%,  $T_{max}$  大部分小于435 °C, 处于未熟—低熟生烃演化阶段。

### 3.4 烃源岩沉积环境

阿拉坦合力群烃源岩 Pr/Ph 分布范围为0.39 ~ 5.24, 平均值为1.62, 且 Pr/Ph 大于1 的样品数为5 个, 表明阿拉坦合力群烃源岩大部分形成于偏还原沉积环境, 部分样品形成于偏氧化环境。伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷分布范围为0.07 ~ 1.45, 平均值为0.37, 且伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷大于0.3 的样品仅有4 个, 表明阿拉坦合力群烃源岩大部分形成于淡水—微咸水沉积环境, 部分样品形成于半咸水—咸水沉积环境。

兴安岭群、阿尔善组、腾一段和腾二段烃源岩 Pr/Ph 均小于1, 表明他们均形成于偏还原沉积环境。兴安岭群烃源岩伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷分布范围为0.20 ~ 0.48, 平均值为0.32, 阿尔善组烃源岩伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷分布范围为0.18 ~ 0.60, 平均值为0.38, 表明其形成于微咸水—半咸水沉积环境。腾一段烃源岩伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷分布范围为0.32 ~ 0.99, 平均值为0.66, 表明其形成于半咸水—咸水沉积环境。腾二段烃源岩伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷分布范围为0.23 ~ 0.27, 平均值为0.25, 均小于0.3, 表明该烃源岩形成于微咸水沉积环境。

### 3.5 烃源岩生源特征

准宝1 井所有烃源岩样品  $C_{29}/C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$  甾烷比值均大于1, 表明烃源岩生源既有低等生物贡献又有高等植物贡献, 且高等植物贡献占优势, 尤其是阿拉坦合力群、兴安岭群、阿尔善组和腾一段均值都在2 左右, 高等植物贡献优势更明显。而且准宝1 井所有样品都以  $C_{29}$  规则甾烷含量最高, 分布范围为35.71% ~ 64.29%, 平均值达到45.52%, 进一步证明准宝1 井所有烃源岩生源既有低等生物贡献又有高等植物贡献, 且高等植物贡献占据优势<sup>[17]</sup>。

## 4 原油物性特征及地球化学特征

### 4.1 原油物性特征

ZB1-2596.4 原油样品的密度为0.85 g/cm<sup>3</sup>, 室温粘度为13.15 mPa·s, 而50 °C时粘度为6.15

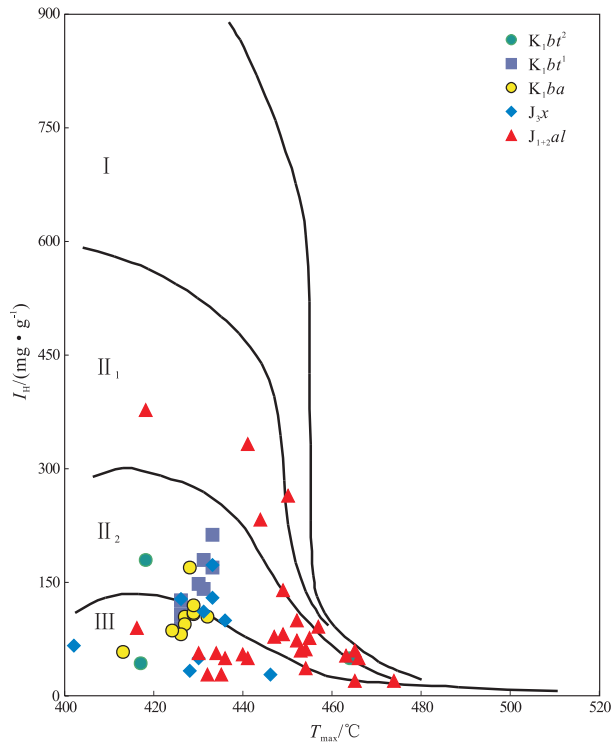


图2 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1 井烃源岩有机质类型

Fig. 2 Organic matter types of source rocks in well Zhunbao 1, Gerileadou Sag, Erlian Basin

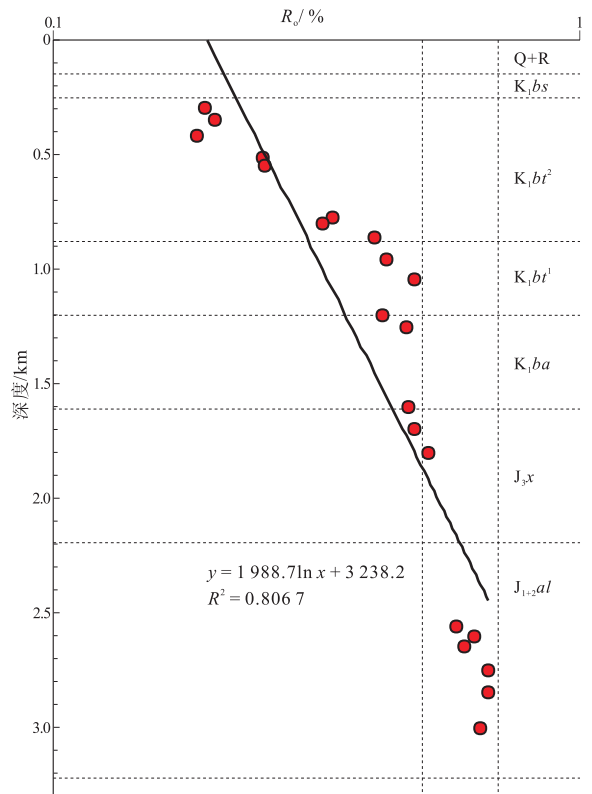


图3 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1 井镜质体反射率随深度变化

Fig. 3 Relationship between vitrinite reflectance and burial depth in well Zhunbao 1, Gerileadou Sag, Erlian Basin

mPa·s,凝固点为9℃,含蜡量达到25.5%,体现出“三低一高”的基本特征,即为低密度、低粘度、低凝固点、高含蜡量,为轻质原油。

#### 4.2 族组成特征

准宝1井原油具有饱和烃含量高、芳香烃及非烃含量中等、沥青质含量低的特点。饱和烃和芳香烃之和占原油的89.39%,饱芳比达到4.56,说明此原油样品处于成熟阶段。

#### 4.3 正构烷烃和类异戊间二烯烷烃组成特征

准宝1井阿拉坦合力群原油样品ZB1-2596.4主峰碳为C<sub>24</sub>,CPI(碳优势指数)值为1.17,OEP(奇偶优势比)值为1.03,CPI和OEP可以有效划分原油成熟度<sup>[12]</sup>,在CPI和OEP划分原油成熟度图版<sup>[18]</sup>上投点,可看出原油是成熟原油;原油样品的Pr/Ph值为3.36,反映原油的烃源岩沉积于偏氧化环境<sup>[19]</sup>。

#### 4.4 萘、甾烷组成特征

伽马蜡烷来源于四膜虫醇<sup>[20-21]</sup>,被认为是盐度或水体分层的标志<sup>[22-24]</sup>。原油样品ZB1-2596.4的伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷的值为0.17,表明原油的烃源岩沉积环境为淡水—微咸水。

原油样品甾烷系列化合物以规则甾烷为主,重排甾烷含量很低;规则甾烷内C<sub>29</sub>/C<sub>27</sub>ααα(20R)甾烷值为2.30,具有明显的C<sub>29</sub>ααα(20R)甾烷优势,C<sub>27</sub>,C<sub>28</sub>,C<sub>29</sub>ααα(20R)甾烷分布型式呈“反L型”(图4),相对百分含量关系为C<sub>27</sub>规则甾烷<C<sub>28</sub>规则甾烷<C<sub>29</sub>规则甾烷。这些特征表明原始母质输入中有低等生物和高等植物的双重贡献,且高等植物占据优势<sup>[17]</sup>。原油样品的C<sub>29</sub>ααα甾烷20S/(20S+20R)值为0.43,C<sub>29</sub>αββ甾烷/(αββ+ααα)值为0.50,表明原油样品为成熟原油。

#### 4.5 三芴系列化合物

芳烃中的三芴系列化合物主要指芴(F)、硫芴

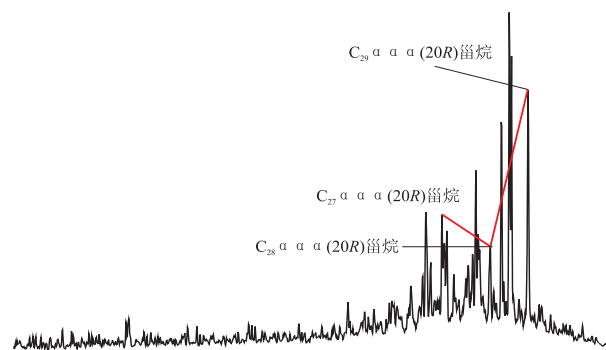


图4 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1井原油规则甾烷分布

Fig. 4 Distribution of regular sterane in crude oil from well Zhunbao 1, Gerileadou Sag, Erlian Basin

(SF)和氧芴(OF)。三芴系列化合物被认为源于同一母质,他们的含量变化常被认为是原始沉积环境的反映<sup>[25]</sup>。三芴系列化合物可能来源于同一母质,芴中五元环的碳原子属于α碳原子,其化学性质活泼,在还原环境中可能被硫取代成硫芴,在弱氧化—氧化环境中被氧化为氧芴<sup>[26]</sup>。准宝1井原油样品中,芴:硫芴:氧芴=24:23:53,说明氧芴占据绝对优势,表明原油样品的沉积环境为氧化。

#### 4.6 轻烃特征

Thompson认为轻烃的组成特征与沉积岩在埋藏史中经历的最高温度有关,可用作原油成熟度表征的参数,并提出了2个具体参数:正庚烷值和异庚烷值<sup>[27-28]</sup>。由图5庚烷值与异庚烷值相关关系进一步证明原油样品为成熟原油。

## 5 油源对比

(1)从图6中可以看出,原油样品与阿拉坦合力群烃源岩具有很好的亲缘性,Pr/Ph值都很高。

(2)由图7知原油样品和阿拉坦合力群烃源岩有很好的亲缘性,说明原油样品来源于阿拉坦合力群烃源岩。

(3)由图8知阿拉坦合力群烃源岩与原油所有参数基本融合在一起,进一步证明原油的烃源岩是阿拉坦合力群。而腾二段、腾一段、阿尔善组和兴安岭群烃源岩与原油或多或少有个别参数存在差异,因此不可能是原油的烃源岩。

(4)由原油(烃源岩)的族组分稳定碳同位素

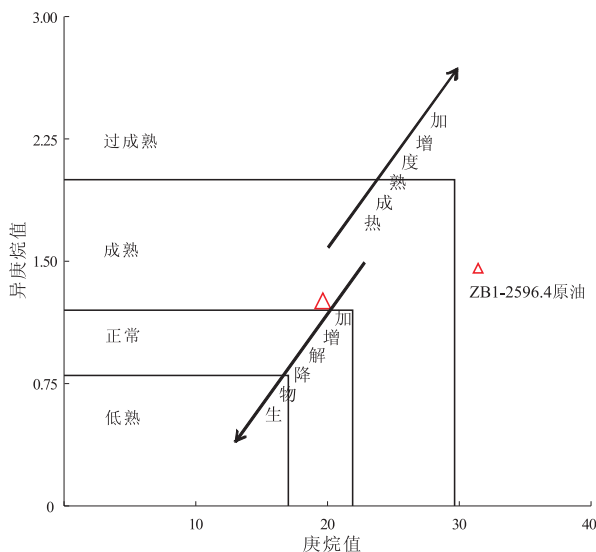


图5 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝1井原油正庚烷值与异庚烷值关系

Fig. 5 Relationship between *n*-heptane and *iso*-heptane in crude oil from well Zhunbao 1, Gerileadou Sag, Erlian Basin

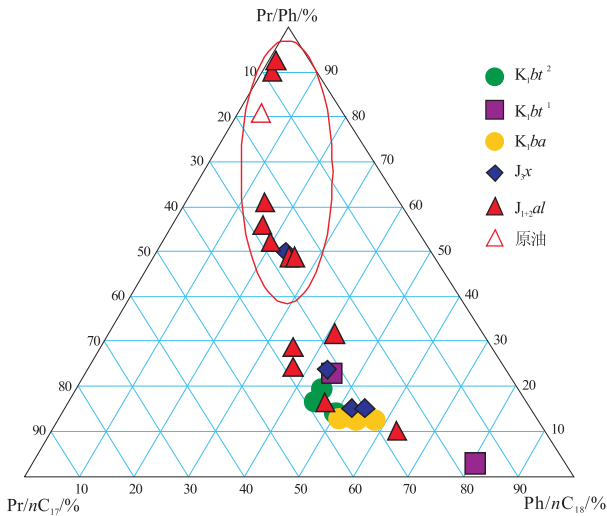


图 6 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝 1 井饱和烃 Pr/Ph-Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub> 分布  
Fig. 6 Distribution of Pr/Ph-Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub> of saturate hydrocarbon from well Zhunbao 1, Gerileadoud Sag, Erlian Basin

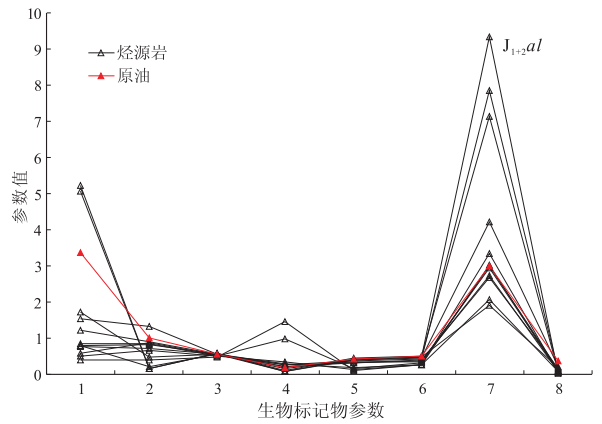


图 8 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝 1 井原油与阿拉坦合力群烃源岩生物标记化合物参数对比  
横坐标数字表示: 1. Pr/Ph; 2. Ts/Tm; 3. C<sub>31</sub> αβ 藿烷 (22S+22R); 4. 伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷; 5. C<sub>29</sub> ααα 甾烷 (20S+20R); 6. C<sub>29</sub> αββ 甾烷/(αββ+ααα); 7. C<sub>29</sub> αβ 藿烷/C<sub>29</sub> Ts; 8. C<sub>30</sub> RAH/C<sub>30</sub> αβ 藿烷

Fig. 8 Comparison of biomarker compound parameters between crude oil and source rock of Alatanheli Group, well Zhunbao 1, Gerileadoud Sag, Erlian Basin

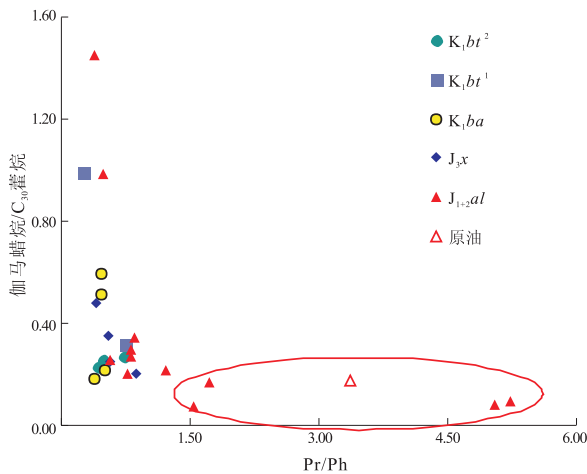
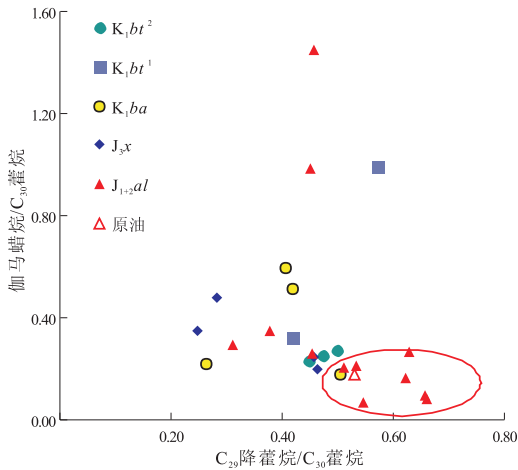


图 7 二连盆地格日勒敖都凹陷准宝 1 井中生界烃源岩和原油生物标记化合物对比

Fig. 7 Comparison between Mesozoic source rock and biomarker compound in crude oil, well Zhunbao 1, Gerileadoud Sag, Erlian Basin

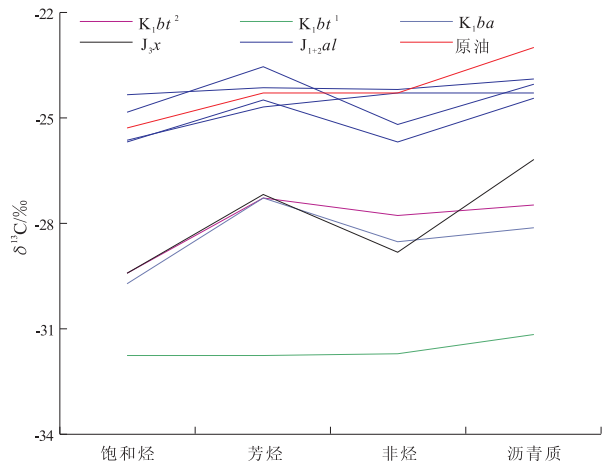


图 9 二连盆地格日勒敖都凹陷烃源岩可溶有机组分 δ<sup>13</sup>C 值分布

Fig. 9 δ<sup>13</sup>C of soluble organic fraction in source rock, Gerileadoud Sag, Erlian Basin

(图 9)也可以看出原油仅和阿拉坦合力群烃源岩样品的族组分碳同位素分布范围相似,都高于-26‰,进一步证明原油来源于阿拉坦合力群烃源岩。

## 6 结论

1) 准宝 1 井只有阿拉坦合力群烃源岩达到好烃源岩标准,而腾二段、腾一段、阿尔善组和兴安岭群烃源岩为差烃源岩;有机质类型以Ⅱ<sub>2</sub>-Ⅲ型为主。

2) 准宝 1 井只有阿拉坦合力群烃源岩有机质处于低熟—成熟生烃演化阶段,而腾二段、腾一段、阿尔善组和兴安岭群烃源岩有机质都处于未熟—低熟生烃演化阶段。

3) 准宝1井阿拉坦合力群原油呈现“三低一高”的基本特征,即低密度、低粘度、低凝固点、高含蜡量,为轻质原油。生物标记物和稳定碳同位素分析表明原油的烃源岩是侏罗系阿拉坦合力群。

4) 研究表明在格日勒敖都凹陷准宝1井阿拉坦合力群发现原油,且凹陷深层勘探程度低,表明阿拉坦合力群是有利的油气勘探方向。

#### 参考文献:

- [1] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M]. 北京:石油工业出版社,1999.
- [2] 赵贤正,卢学军,王权. 华北油田地层-岩性油藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质,2007,28(5):597-604.
- [3] 刘昌毅. 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷宝饶构造带构造特征及其控藏作用[J]. 油气地质与采收率,2006,13(3):35-38.
- [4] 管穆兰,库国正,张放东,等. 白音查干凹陷构造特征与油气关系[J]. 断块油气田,2005,12(3):16-18.
- [5] 邓已寻,张放东,库国政,等. 白音查干凹陷达尔其地区油藏地质特征研究[J]. 油气地质与采收率,2004,11(1):23-25,35.
- [6] 刘震,刘俊榜,高先志,等. 二连盆地岩性油藏的幕式充注和相对早期成藏特征分析[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):240-249.
- [7] 焦贵浩,王同和,郭绪杰,等. 二连裂谷构造演化与油气[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [8] 赵澄林,祝玉衡,季汉成,等. 二连盆地储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [9] 尹志军,田世清,杨志彬. 内蒙二连盆地赛汉塔拉凹陷下白垩统层序地层及有利成藏条件[J]. 古地理学报,2009,11(3):330-337.
- [10] 田福清. 二连盆地巴音都兰凹陷烃源岩评价及油源研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(4):541-543.
- [11] 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, 1255-1268.
- [12] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide; interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [13] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide[M]. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 1155.
- [14] 李忠雄,何江林,杜佰伟,等. 羌塘盆地羌资2井布曲组碳酸盐岩生物标志物特征及意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2):175-180.
- [15] 黄第藩,陶国立,王铁冠,等. 酒东盆地石油地质地球化学综合研究和远景评价[M]. 北京:北京石油勘探开发科学研究院,1990.
- [16] 陈建平,赵长毅,何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发,1997,24(1):1-5.
- [17] Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43:739-745.
- [18] 陈建平,黄第藩,陈建军. 酒东盆地油气生成和运移[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [19] Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, et al. Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation[J]. Nature, 1978, 272:216-222.
- [20] Venkatesan M I. Tetrahymanol: Its widespread occurrence and geochemical significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53:3095-3101.
- [21] Haven T, Rohmer H L, Rulkotter J. Tetrahymanol, the most likely precursor of gammacerane, occurs ubiquitously in marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53:3073-3079.
- [22] Ourisson G, Rohmer M, Poralla K. Prokaryotic hopanoids and other ployterpenoid sterol surrogates[J]. Annual Review of Microbiology, 1987, 41:301-333.
- [23] Kleemann G, Poralla K, Englert G, et al. Tetrahymanol from the phototrophic bacterium *Rhodoseudomonas palustris*: first report of a gammacerane triterpene from a prokaryote[J]. Journal of General Microbiology, 1990, 136:2551-2553.
- [24] Sinninghe Damste J S, Kenig F, Koopmans M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59:1895-1900.
- [25] 李水福,何生. 原油芳烃中三萜系列化合物的环境指示作用[J]. 地球化学, 2008, 37(1):45-50.
- [26] 林壬子,王培荣,戴允健,等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[C]//中国地质学会. 有机地球化学论文集. 北京:地质出版社,1987:129-140.
- [27] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(5):657-672.
- [28] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2):303-316.

(编辑 徐文明)