

# 乌兰花凹陷原油特征及成因

冯伟平<sup>1,2,3,4</sup>, 王飞宇<sup>4</sup>, 王宗秀<sup>1,2,3</sup>, 师玉雷<sup>5</sup>, 江涛<sup>5</sup>, 王予帆<sup>6</sup>, 周洪峰<sup>6</sup>

FENG Weiping<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Feiyu<sup>4</sup>, WANG Zongxiu<sup>1,2,3</sup>, SHI Yulei<sup>5</sup>, JIANG Tao<sup>5</sup>, WANG Yufan<sup>6</sup>, ZHOU Hongfeng<sup>6</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
4. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
5. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北 任丘 062552;
6. 中国石油华北油田分公司二连分公司, 内蒙古 锡林浩特 026000

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*
5. *Research Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, Hebei, China;*
6. *Erlian Company, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Xilinhaote 026000, Inner Mongolia, China*

FENG W P, WANG F Y, WANG Z X, et al., 2020. Characteristics and origin of crude oils in the Wulanhua sag [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 932 - 940. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.074

**Abstract:** The Wulanhua sag is a newly discovered oil-rich sag in the Erlian basin. The physical and geochemical properties of crude oils in the Wulanhua sag were systematically analyzed to reveal the characteristics and origins. The physical properties of crude oils suggest that the API gravities range from 20.2° to 40.0°, and most are normal crude oil. The biomarker parameters show considerable variation among the oils from different tectonic units, which can be separated into two crude oil families. Crude oil family-I is dominated by oils from the Tumuer tectonic unit, and characterized by low Pr/Ph and C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> TT, and relatively high gammacerane/C<sub>31</sub> hopane and regular sterane/C<sub>30</sub> hopane. Crude oil family-I is mostly derived from the algal organic matter at low maturity levels. Crude oil family-II consists of oils from the Saiwusu and Hongjing tectonic units, which is characterized by high Pr/Ph and C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> TT, and relatively low gammacerane/C<sub>31</sub> hopane and regular sterane/C<sub>30</sub> hopane. Crude oil family-II is mainly derived from the mixed algal and terrigenous organic matter at higher maturity levels. Carbon isotopic compositions of crude oil and individual n-alkanes indicate that these two crude oil families should be the products of the same set of source rocks at different maturity levels, and likely derived from the K<sub>1ba</sub> source rock in the southern sub-sag. The factors controlling differences between the two crude oil families include the heterogeneous source rock and its maturation process.

**Key words:** Wulanhua sag; Erlian basin; crude oil; geochemical characteristics; carbon isotope

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190085); 国家油气重大专项 (2016ZX05007001-003); 中国石油华北油田公司合作课题 (HBYT-YJY-2017-JS-152)

**第一作者简介:** 冯伟平 (1987-), 男, 博士后, 从事石油地质学研究工作。E-mail: fengwp1232@163.com

**通讯作者:** 王飞宇 (1963-), 男, 教授, 主要从事石油地质学方面的教学和科研作用。E-mail: fywang@cup.edu.cn

**收稿日期:** 2020-08-08; **修回日期:** 2020-10-11; **责任编辑:** 范二平

**引用格式:** 冯伟平, 王飞宇, 王宗秀, 等, 2020. 乌兰花凹陷原油特征及成因 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 932-940. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.074

**摘要:** 乌兰花凹陷是二连盆地南部新发现的富油凹陷, 对乌兰花凹陷原油物理性质和地球化学性质进行了系统的分析以揭示其特征及来源。原油物理性质显示, 乌兰花凹陷原油比重 (API gravity) 介于  $20.2^{\circ}\sim 40.0^{\circ}$  之间, 主体为正常原油。原油生物标志化合物参数表明, 不同构造带之间原油特征存在差异, 可以划分为两类原油。一类以土牧尔构造带原油为主, 具有低姥值比 (Pr/Ph) 和  $C_{21}/C_{23}$  三环萜烷, 相对较高的伽马蜡烷/ $C_{31}$  藿烷和规则甾烷/ $C_{30}$  藿烷的特征, 原油主要为烃源岩在成熟阶段早期的产物, 主要以藻类来源为主。另一类原油包括赛乌苏和红井构造带原油, 具有高姥值比 (Pr/Ph) 和  $C_{21}/C_{23}$  三环萜烷, 相对较低的伽马蜡烷/ $C_{31}$  藿烷和规则甾烷/ $C_{30}$  藿烷, 主要为陆源有机质和藻类有机质混合来源, 原油具有更高的成熟度。原油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素表明这两类原油应是一套烃源岩在不同成熟阶段的产物, 原油主要来源于南洼槽阿尔善组烃源岩。阿尔善组烃源岩的非均质性和成熟度导致了两类原油的差异。

**关键词:** 乌兰花凹陷; 二连盆地; 原油; 地球化学特征; 碳同位素

**中图分类号:** TE122.1      **文献标识码:** A

## 0 引言

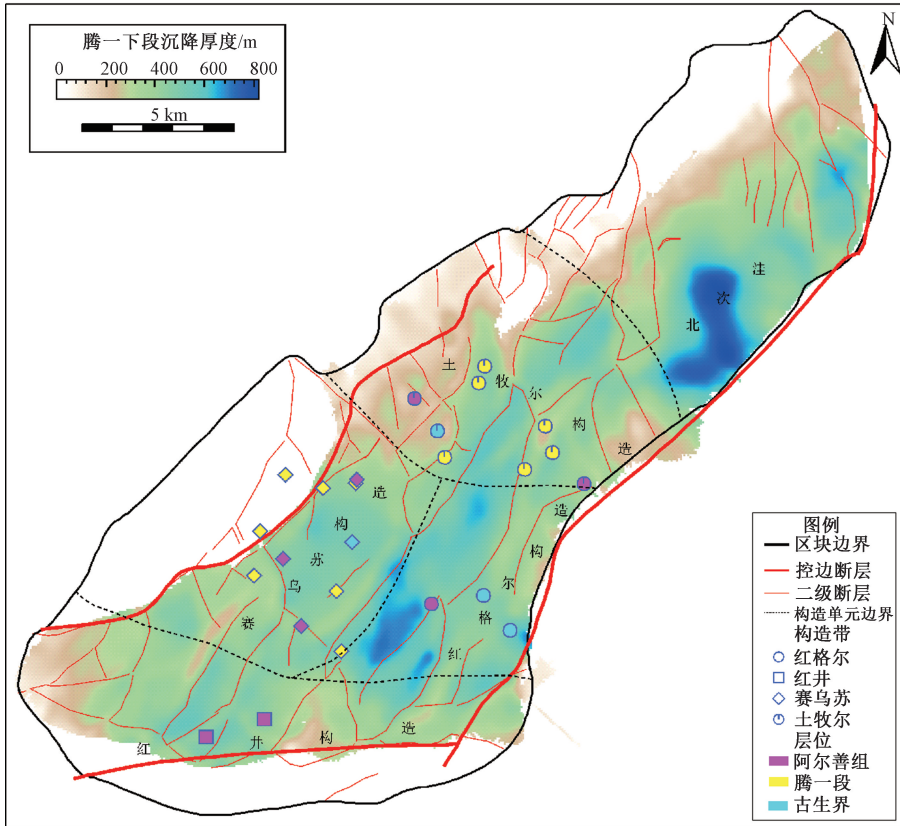
乌兰花凹陷是二连盆地南部新发现的富油凹陷, 2011年在南洼槽钻探的 LD1 井获得了低产工业油流, 随后相继发现了土牧尔、赛乌苏、红格尔和红井四个含油构造单元, 确定了古生界 (Pz)、阿尔善组 ( $K_1ba$ ) 和腾一段 ( $K_1bt^1$ ) 三个含油层系, 所有发现的油气主要集中在凹陷南次洼和中部 (土牧尔构造带)。目前对乌兰花凹陷的研究较少, 已发表的论文主要关注凹陷构造发育史 (王鑫等, 2013)、沉积特征 (袁红旗等, 2016; Fu et al., 2019a) 和储层特征 (张以明等, 2018; 彭宇等, 2019), 但缺少系统的原油性质和成因的分析。Fu et al. (2019b) 对乌兰花凹陷烃源岩、油砂和原油样品进行了分析, 主要利用姥值比 (Pr/Ph) 和伽马蜡烷指数等参数进行油族划分和油源对比, 认为乌兰花凹陷原油可划分为两种类型, 一类原油主要以高 Pr/Ph 和低伽马蜡烷为特征, 主要来源于赛乌苏构造带的阿尔善组烃源岩; 另一类原油具有低的 Pr/Ph 和高伽马蜡烷的特征, 主要来源于赛乌苏构造带腾一段烃源岩。然而其展示的阿尔善组和腾一段烃源岩的 Pr/Ph (0.14~2.02) 和伽马蜡烷/ $C_{30}$  藿烷 (0.014~1.9) 变化较大, 两个层位的烃源岩在地球化学上并没有明显的区分, 同时赛乌苏构造带中腾一段烃源岩类型较差, 主要为 D/E 和 F 相源岩 (以陆源有机质为主, 初始氢指数分别为 200~400 mg/g 和小于 200 mg/g), 源岩成熟度整体较低, 不能大量排油 (杨雪迪, 2018; 冯伟平, 2018)。此外由于富

藻类有机质在未熟—低熟阶段可以排出烃类, 如巴音都兰凹陷中发现大量的未熟—低熟油 (程志强等, 2018), 在二连盆地其他凹陷中这些优质烃源岩排出的烃类不一定形成规模的油气藏, 可能以油砂的形式存在, 因此对于二连盆地这种小型断陷盆地, 在进行油源对比时应慎用油砂样品。

文中收集了 12 口探井的 19 个原油样品的物理性质, 并对其中 17 个样品进行了饱和烃色谱色质 (GC/MS) 分析和 3 个样品进行了全油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素分析。GC/MS 在华北油田勘探开发研究院 Thermao Scientific ISO 单四极杆气相色谱-质谱连用分析仪上进行。原油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素分别在中国石油大学 (北京) EA-MAT 253 IRMS 元素-稳定同位素质谱仪和 7980GC-Precision 同位素质谱仪上进行。通过系统地对原油物理性质和地球化学特征分析, 讨论油气来源, 为进一步的油气勘探提供基础。

## 1 区域地质概况

乌兰花凹陷位于二连盆地南部温都尔庙隆起之上, 凹陷整体呈北东走向, 面积约  $350\text{ km}^2$ 。凹陷包括南、北两个次级洼槽和中间的土牧尔构造带, 其中南次洼可以进一步划分为赛乌苏、红井和红格尔构造带三个构造单元 (图 1)。凹陷基底为古生界花岗岩, 盖层主要为下白垩统地层, 最大厚度可达 3300 m (王鑫等, 2013)。下白垩统地层自下向上依次为阿尔善组、腾一段、腾二段和赛汉塔拉组。



图中不同形状的点区分不同构造带的原油, 不同颜色区分原油的层位

图 1 乌兰花凹陷构造单元及原油样品位置

Fig. 1 Tectonic units and crude oil sample locations in the Wulanhua sag

阿尔善组沉积时期, 凹陷快速沉降, 以短轴方向物源为主, 陆源沉积物供给较少, 发育大面积的深湖—半深湖沉积环境 (王鑫等, 2013; 袁红旗等, 2016)。而在腾一下段沉积时期, 由于凹陷东南部抬升, 大量陆源物质从凹陷东南部进入凹陷, 形成大面的扇三角洲沉积, 并且扇三角洲沉积持续向北次级洼槽方向推进, 深湖—半深湖环境单位逐渐减小, 至腾一上段沉积时期, 深湖—半深湖环境仅发育在北次级洼槽内, 南洼槽主要以扇三角洲沉积为主 (袁红旗等, 2016)。在腾二段沉积早期, 湖盆在短暂的抬升之后开始快速沉降, 又一次进入了断陷湖盆稳定期 (王鑫等, 2013)。赛汉塔拉组沉积时期, 断层活动明显减弱, 在南北次级洼槽中心以滨浅湖沉积为主, 周缘以河流和沼泽相沉积为主 (王鑫等, 2013)。阿尔善组和腾一段沉积中暗色泥岩普遍发育, 为生油提供了很好的物质基础, 同时阿尔善组和腾一段也是主要的油气勘探目标 (王鑫等, 2013; 张以明等, 2018; 彭宇等, 2019)。

## 2 原油物理性质

乌兰花凹陷原油总体上具有中—高 API 比重 (中—低密度)、低胶质+沥青质含量的特征, 原油 API 介于  $20.2^{\circ}\sim 40.0^{\circ}$  (密度为  $0.825\sim 0.933\text{ g/cm}^3$ ) 之间, 主体上集中在  $27^{\circ}\sim 40^{\circ}$  之间, 胶质+沥青质含量介于  $10.5\%\sim 32.6\%$  之间 (表 1, 图 2), 原油 API 比重与胶质+沥青质含量呈现出负相关关系 (图 3)。同时, 乌兰花凹陷原油具有较低的粘度 ( $11\sim 117\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) 和含硫量 (小于  $0.7\%$ ) 的特征。通常, 源岩灶在成熟阶段早期排出低 API 比重的原油, 随着成熟度的增加, 源岩灶排出的原油 API 比重也随之增加 (Tissot and Welte, 1984; Spigolon et al., 2015), 因此, 原油 API 比重可以大致反映原油的成熟度 (Peters, et al., 2005; Feng et al., 2020)。垂向上, 乌兰花凹陷原油 API 总体上随着深度的增加而增加, 反映不同成熟阶段的原油在空间上有序展开。同时古生界和阿尔善组原油 API

比重整体上高于腾一段原油 (图 2), 表明古生界和阿尔善组原油成熟度略高于腾一段原油。平面上, 不同构造单元之间原油性质略有差异, 土牧尔构造带原油 API 比重相对比较集中, 主要介于

30.6°~35.9°之间, 而赛乌苏、红格尔和红井三个构造带含有更多高 API 比重原油 (表 1 和图 2), 说明相对于土牧尔构造带, 其他三个构造带含有更多的成熟度更高的原油。

表 1 乌兰花凹陷不同构造带原油物理性质

Table 1 Physical properties of crude oils from different tectonic units in the Wulanhua sag

构造带	层位	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	API/ (°)	黏度/ (mPa·s)	凝固点/ ℃	硫含量/ %	蜡含量/ %	胶质+沥青质 含量/%
赛乌苏	K <sub>1</sub> bt <sup>1</sup> 、K <sub>1</sub> ba、Pz	0.8358~0.9330	20.2~37.8	11~49	31~53	0.05~0.69	20.5~30.8	10.5~32.6
土牧尔	K <sub>1</sub> bt <sup>1</sup> 、K <sub>1</sub> ba、Pz	0.8451~0.8731	30.6~35.9	13~71	28~35	0.19~0.65	23.2~25.6	18.4~25.5
红格尔	K <sub>1</sub> bt <sup>1</sup> 、K <sub>1</sub> ba、Pz	0.825~0.889	27.7~40.0	11~12.47	31~32	-	-	-
红井	K <sub>1</sub> bt <sup>1</sup> 、K <sub>1</sub> ba	0.836~0.888	27.8~37.8	30~171	34~35	0.12~0.14	24~25	22~31

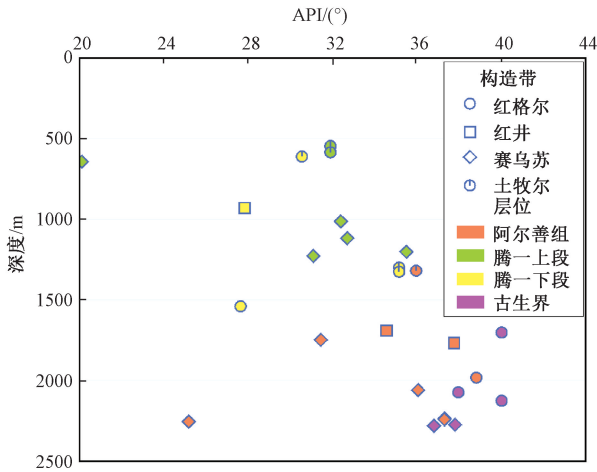


图 2 乌兰花凹陷原油 API 比重随深度的变化

Fig. 2 API gravities vary with burial depth for crude oils in the Wulanhua sag

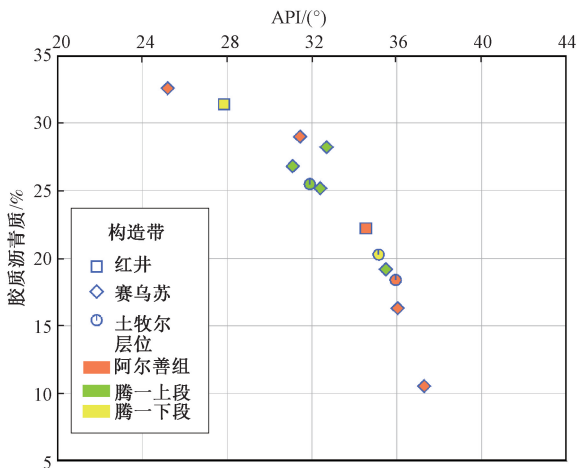


图 3 乌兰花凹陷原油 API 比重与胶质+沥青质的关系

Fig. 3 Relationship between API gravity and Rein plus Aphetene content for crude oils in the Wulanhua sag

### 3 原油地球化学特征

#### 3.1 母质来源相关的参数

乌兰花凹陷原油饱和烃色谱显示出了相似的特征, 均为单峰型, 主峰碳为 nC<sub>21</sub> 或 nC<sub>23</sub>, 无明显的奇偶优势 (图 4)。所有样品的饱和烃色谱显示正构烷烃完整, 表明原油未遭受生物降解。丰富的高碳数的正构烷烃指示了藻类或陆源高等植物的输入 (Peters and Moldowan, 1983; Johnson et al., 2003)。

Pr/Ph 和伽马蜡烷/C<sub>31</sub> 藿烷是常用的判断原油母质沉积环境的指标 (Ten Haven et al., 1987; Fu et al., 1990; 梁狄刚等, 2001; Peters et al., 2005; 周磊等, 2018; 郭永岩等, 2019; Feng et al., 2020)。土牧尔构造带原油 Pr/Ph 介于 0.50~0.78 之间, 表明原油母质沉积于还原环境, 同时土牧尔构造带原油含有更丰度的伽马蜡烷, 伽马蜡烷/C<sub>31</sub> 藿烷为 0.80~1.53, 表明其母质沉积于淡水—微咸水环境 (图 5a、图 6)。赛乌苏构造带原油 Pr/Ph 介于 0.32~1.15 之间, 但大部分样品 Pr/Ph 大于 0.8, 红井构造带原油 Pr/Ph 为 1.02~1.05, 同时赛乌苏和红井构造带原油具有相对较低的伽马蜡烷含量, 伽马蜡烷一般不高于相邻的 C<sub>31</sub> 藿烷, 伽马蜡烷/C<sub>31</sub> 藿烷主体介于 0.18~0.69, 表明赛乌苏和红井构造带原油母质沉积于更加氧化的淡水环境 (图 5a、图 6)。

Pr/nC<sub>17</sub> 和 Ph/nC<sub>18</sub> 也可以反映母质类型和沉积环境, 如图 5b 所示, 土牧尔构造带原油主要来源于非海相藻类有机质, 赛乌苏和红井构造带原油主要为藻类和陆源有机质混合来源。原油中三

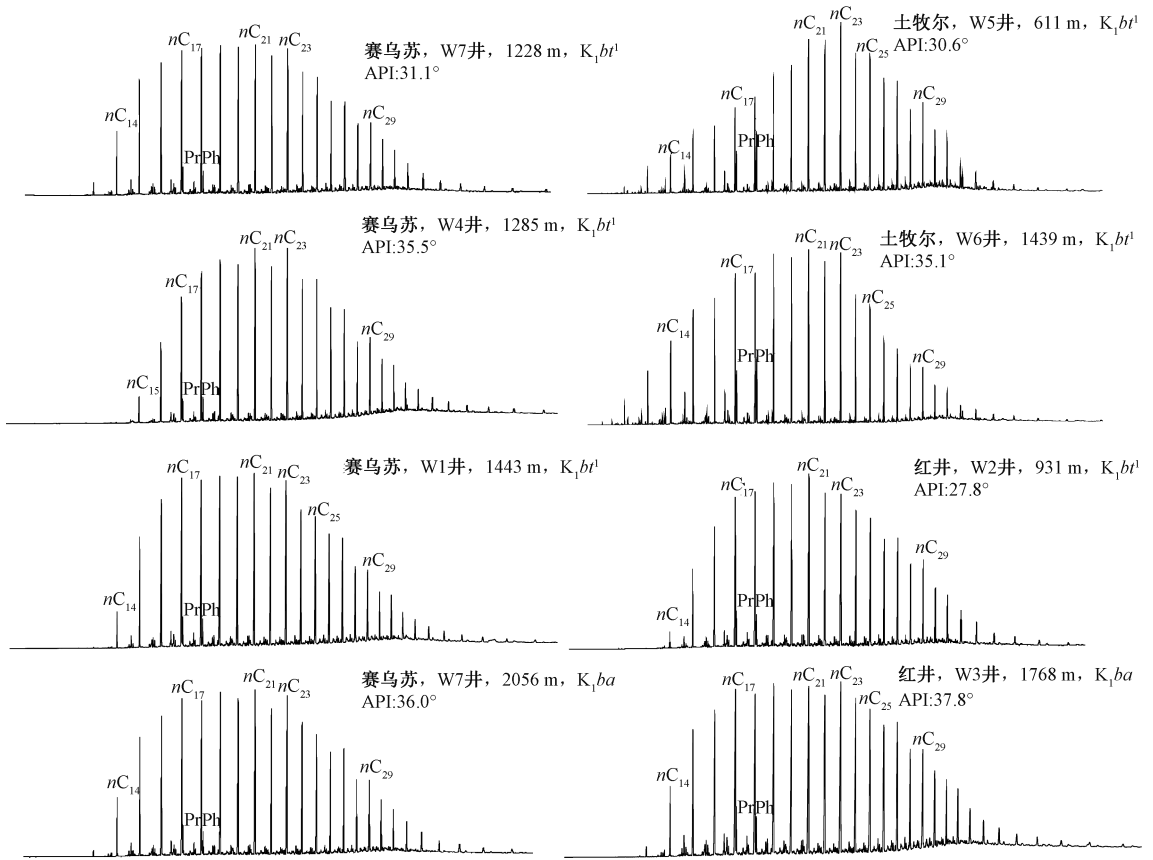
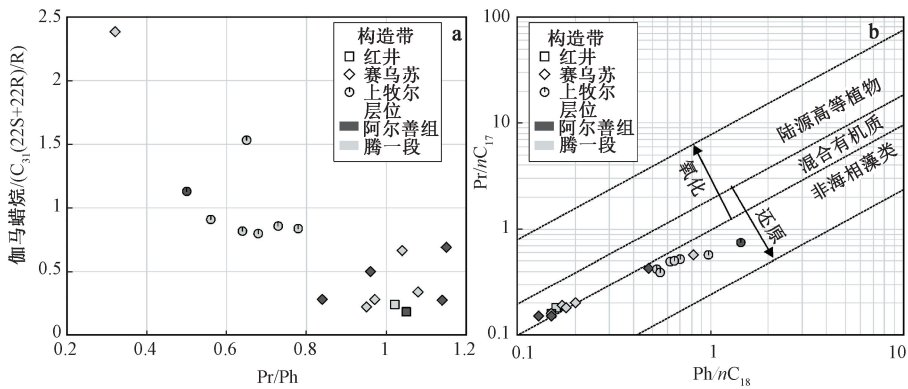


图 4 乌兰花凹陷原油饱和烃气相色谱

Fig. 4 Saturated hydrocarbon gas chromatography of crude oils in the Wulanhua sag



a—Pr/Ph 与伽马蜡烷/C<sub>31</sub> 藿烷的关系图；b—Ph/nC<sub>18</sub> 与 Pr/nC<sub>17</sub> 关系图

图 5 乌兰花凹陷原油类异戊二烯烷烃与萜烷参数特征

Fig. 5 Isoprenoids and Terpenes parameter characteristics for crude oils in the Wulanhua sag

环萜烷系列化合物的分布也反映了母质沉积环境和有机质输入特征 (Zumberge, 1987; Sofer, 1988; Tao et al., 2015; 肖红等, 2019), 如以藻类为主的咸水湖相原油往往具有 C<sub>23</sub> 三环萜烷优势, 而高的陆源有机质的输入的烃源岩生成的原油往往具有高的 C<sub>19</sub> 或 C<sub>21</sub> 三环萜烷, 因此可以用 C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> 三环萜烷比值判断有机质的类型。乌兰花

凹陷原油均具有相对较低的三环萜烷含量, 且 C<sub>21</sub> 三环萜烷占优势 (图 6), 但赛乌苏和红井构造带原油比土牧尔构造带原油具有更高的 C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> 三环萜烷值, 反映赛乌苏和红井构造带中原油母质中具有更多的陆源物质的输入 (图 7)。规则甾烷/C<sub>30</sub> 藿烷值常用于反映真核生物和原核生物的相对贡献 (Peters et al., 2005), 土牧尔构造带原油规

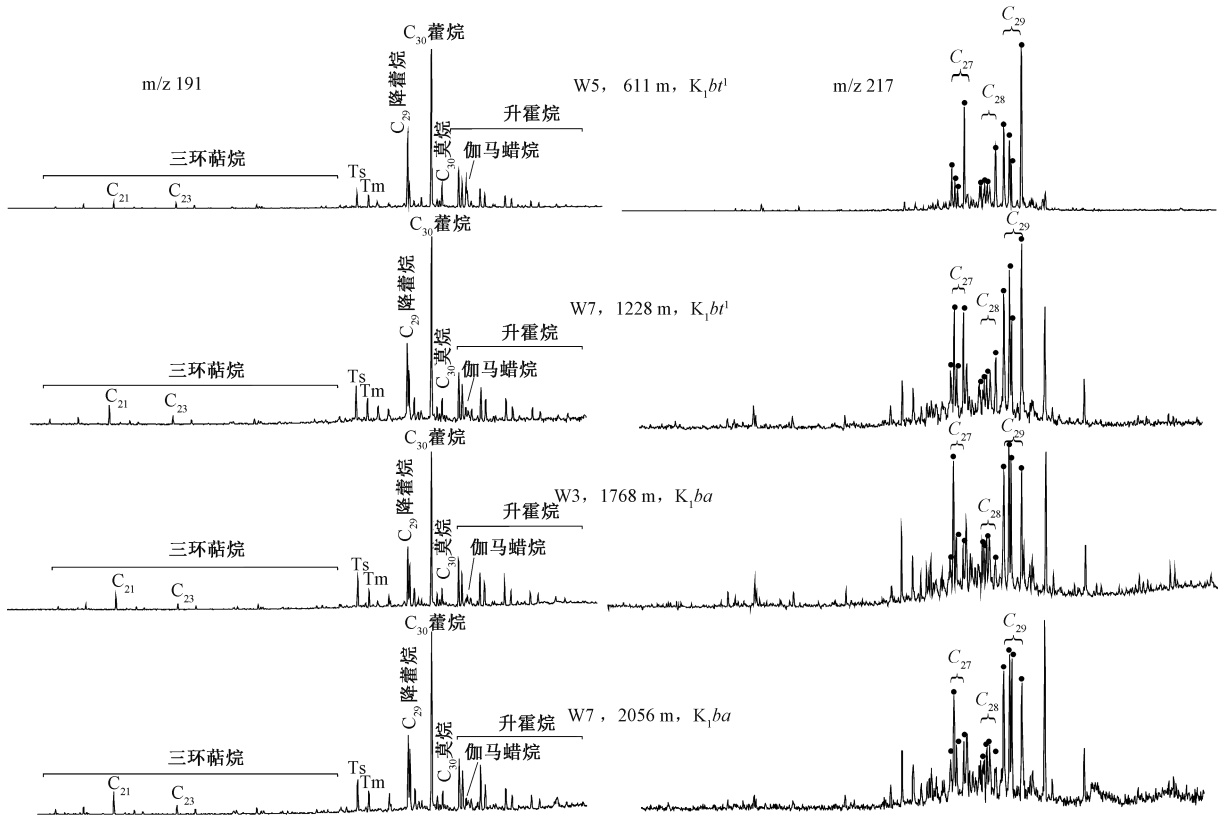


图 6 乌兰花凹陷原油生物标志化合物特征

Fig. 6 Biomarker characteristics of crude oils in the Wulanhua Sag

则甾烷/C<sub>30</sub> 藿烷值明显高于赛乌苏和红井构造带原油, 反映出母质来源的细微变化 (图 7)。

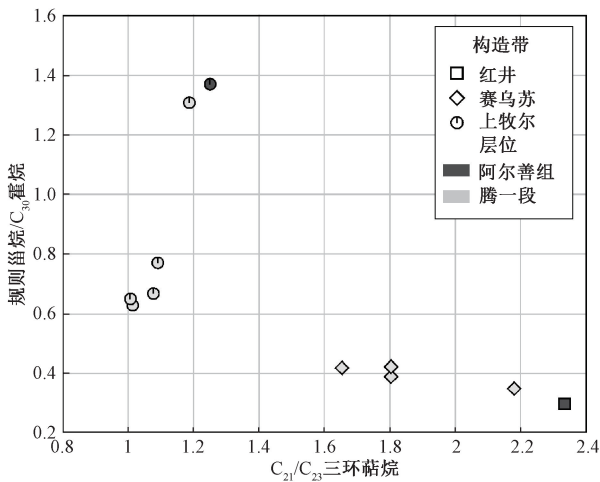


图 7 乌兰花凹陷 C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> 三环萜烷值与规则甾烷/C<sub>30</sub> 藿烷的关系

Fig. 7 Relationship between C<sub>21</sub>/C<sub>23</sub> tricyclic terpane and regular sterane/C<sub>30</sub> hopane for crude oils in the Wulanhua sag

乌兰花凹陷原油规则甾烷呈现出 C<sub>29</sub>>C<sub>27</sub>>C<sub>28</sub> 的特征 (图 6), 由于 C<sub>29</sub> 规则甾烷的来源极其复

杂, 规则甾烷在反映母质输入上成功率不是很高 (Grantham, 1986; Peters et al., 2005)。乌兰花凹陷原油 C<sub>27</sub>-C<sub>28</sub>-C<sub>29</sub> 规则甾烷相对质量分数的特征与东戈壁盆地早白垩世原油样品一致, 高的 C<sub>29</sub> 规则甾烷主要与藻类的输入有关, 相对低的 C<sub>28</sub> 规则甾烷主要与陆源有机质的输入有关 (Johnson et al., 2003)。

### 3.2 成熟度相关参数

C<sub>29</sub> 甾烷异构化参数 (20S/(20S+20R) 和 αββ/(αββ+ααα))、Pr/nC<sub>17</sub> 和 Ph/nC<sub>18</sub> 是最常用的成熟度参数 (Peters et al., 2005)。土牧尔构造带原油 C<sub>29</sub> 甾烷 20S/(20S+20R) 和 αββ/(αββ+ααα) 两个参数均介于 0.25~0.40 之间, 主要为低熟原油, 赛乌苏构造带大部分原油和红井构造带原油 C<sub>29</sub> 甾烷异构化参数大于 0.40, 为成熟油, 少部分原油成熟度与土牧尔构造带原油相似, 为低熟油 (图 8)。Pr/nC<sub>17</sub> 和 Ph/nC<sub>18</sub> 显示出的原油成熟度与 C<sub>29</sub> 甾烷异构化参数相同, 总体上, 土牧尔构造带原油成熟度略低于赛乌苏和红井构造带, 土牧尔构造带主要为低熟油, 赛乌苏构造带和红井构造带原油以成熟油为主。

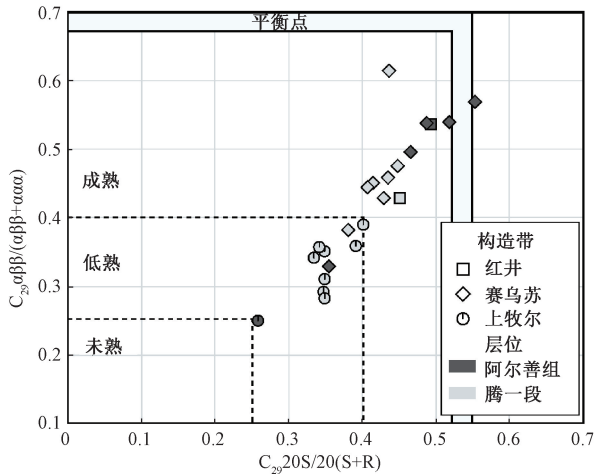


图 8 乌兰花凹陷原油  $C_{29}$  甾烷  $20S/(20S+20R)$  和  $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  关系图

Fig. 8 Relationship between  $C_{29}$  sterane  $20S/(20S+20R)$  and  $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$  for crude oils in the Wulanhua sag

### 3.3 碳同位素特征

原油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素可用于判断原油成因，通常认为相同来源的原油成熟度相近时，原油碳同位素差异不超过  $1\text{‰}$ ，同源不同成熟度的原油碳同位素差异在  $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$  以内，大于  $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$  为非同源原油 (Peters et al., 1993, Peters and Moldowan, 1993, 2005; 米敬奎等, 2008; 罗明霞等, 2019; 刁帆等, 2020)。赛乌苏构造带 W4 井、土牧尔构造带 W5 和 W6 井全油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素含量如表 2 和图 9 所示。赛乌苏 W4 井原油碳同位素为  $-29.2\text{‰}$ ，土牧尔构造带原油碳同位素相对较轻，为  $-31.2\text{‰} \sim -31.8\text{‰}$ 。同时，相对于赛乌苏 W4 井原油，土牧尔构造带原油单体烃碳同位素整体较轻，但三个原油样品单体烃碳同位素在  $nC_{15} \sim nC_{28}$  之前显示出相似的变化趋势，碳同位素随着正构烷烃碳数的增加先变轻后变重。

表 2 乌兰花凹陷典型原油碳同位素

Table 2 Carbon isotope values for typical crude oils in the Wulanhua sag

构造带	井号	层位	$\delta^{13}C/\text{‰}$
赛乌苏	W4	$K_1bt^1$	-29.2
土牧尔	W5	$K_1bt^1$	-31.2
土牧尔	W6	$K_1bt^1$	-31.8

## 4 原油类型与成因

根据原油地球化学特征，乌兰花凹陷原油可

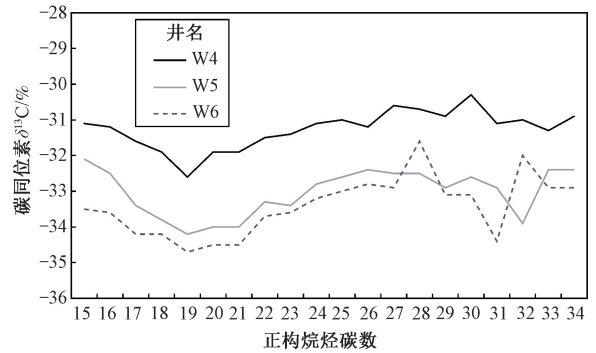


图 9 乌兰花凹陷典型原油饱和烃单体烃碳同位素  
Fig. 9 Carbon isotopic compositions of individual n-alkanes of typical crude oils in the Wulanhua sag

以大致分为两类，一类以土牧尔构造带原油为主，具有低  $Pr/Ph$  和  $C_{21}/C_{23}$  三环萜烷，相对较高的伽马蜡烷/ $C_{31}$  藿烷和规则甾烷/ $C_{30}$  藿烷，原油主要为烃源岩在成熟阶段早期的产物，且有机质类型主要以藻类为主。另一类原油包括赛乌苏和红井构造带原油，具有高的  $Pr/Ph$  和  $C_{21}/C_{23}$  三环萜烷，相对较低的伽马蜡烷/ $C_{31}$  藿烷和规则甾烷/ $C_{30}$  藿烷，原油具有更高的成熟度和更多的陆源有机质的输入。然而这两类原油的全油碳同位素相差小于  $3\text{‰}$ ，且正构烷烃单体烃碳同位素在  $nC_{15} \sim nC_{28}$  之间的变化趋势是相似的，表明这两类原油应是一套烃源岩在不同成熟阶段的产物。

二连盆地和相邻的东戈壁盆地下白垩统湖相源岩中有机质来源主要为藻类和陆源有机质 (Johnson et al., 2003; 程志强等, 2018)，烃源岩初始氢指数 (HI) 反映了两种来源有机质的相对比例，同时不同类型的源岩的生烃特征也是有差异的 (Pepper and Corvi, 1995)。程志强等 (2018) 报道了二连盆地巴音都兰凹陷南洼槽和乌里雅斯太凹陷南洼槽烃源岩有机相和原油物理性质，研究表明两个凹陷原油物理性质截然不同，巴音都兰原油为典型 C 相源岩 (富藻类有机质为主，初始  $HI=900 \text{ mg/g}$ ) 在未熟—低熟阶段的产物，原油 API 为  $17^\circ \sim 31^\circ$ ，而乌里雅斯太凹陷原油主要为典型 D/E 相源岩在成熟阶段的产物，原油 API 为  $32^\circ \sim 45^\circ$ 。乌兰花凹陷原油的 API 主体上介于  $27^\circ \sim 40^\circ$  之间，介于巴音都兰和乌里雅斯太凹陷两种原油之间，同时与赛汉塔拉凹陷原油 API 范围相近 (王浩等, 2017)，表明乌兰花凹陷原油主要来源于初始 HI 在  $500 \sim 600 \text{ mg/g}$  的 C 相源岩和 D/E 相源岩。

由于目前已发现的油气主要集中在南次洼周缘, 且土牧尔构造带在腾二段沉积末期开始反转, 形成背斜构造 (王鑫等, 2013), 因此乌克兰花凹陷目前已发现的油气应主要来源于南次洼。湖相源岩往往是高度非均质的 (王飞宇等, 2016; 程志强等, 2018), 乌克兰花凹陷阿尔善组沉积时期, 发育广泛的深湖—半深湖环境, 南次洼中阿尔善组发育 C、D/E 和 F 相源岩, 而随着凹陷东南部物源供给的增加, 南次洼腾一段主要为 F 相和少量 D/E 相源岩, 同时岩石热解数据表明腾一段大部分烃源岩成熟度处于未成熟阶段 (杨雪迪, 2018; 冯伟平, 2018)。因此乌克兰花凹陷原油应主要来源于南次洼阿尔善组烃源岩。由于初始氢指数越高的烃源岩越早排烃, 因此阿尔善组 C 相源岩先进入生油窗, 随着埋深的进一步增加, D/E 相源岩后进入生油窗, 因此不同有机相源岩在成熟过程中形成了两类原油。

## 5 结论

(1) 乌克兰花凹陷原油 API 介于  $20.2^{\circ} \sim 40.0^{\circ}$  之间, 具有中—高 API 比重 (中—低密度)、低胶质+沥青质含量的特征, 主要为正常原油。

(2) 乌克兰花凹陷原油可以划分为两类, 一类原油以土牧尔构造带原油为代表, 原油成熟度较低, 母质主要沉积于还原条件下的藻类有机质为主; 另一类原油主要来自于赛乌苏和红井构造带, 原油显示出更高的成熟度, 母质沉积于更加氧化的环境, 主要为混合有机质来源。

(3) 两类原油的全油碳同位素相差小于 3‰, 同时正构烷烃单体碳同位素在  $nC_{15}—nC_{28}$  之间显示出相似的变化趋势, 表明乌克兰花凹陷原油为同一套烃源岩在不同成熟阶段的产物。结合烃源岩有机相和成熟度的研究, 表明乌克兰花凹陷原油主要来源于南次洼中阿尔善组烃源岩。

## References

CHENG Z Q, WANG F Y, JIANG T, et al., 2018. Organic facies and hydrocarbon generation characteristics of Lower Cretaceous source rocks in Northeastern Erlian Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 39 (4): 384-392. (in Chinese with English abstract)

DIAO F, WANG J W, CHEN X N, et al., 2020. Correlation of oils and source rocks and genesis of high wax oils in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42 (1): 117-125. (in Chinese with English abstract)

FENG W P, 2018. Analysis of the Early Cretaceous source kitchen of typical sags in the Erlian Basin and their significances [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)

FENG W P, WANG F Y, JIANG T, et al., 2020. Origin and accumulation of petroleum in deep precambrian reservoir in Baxian Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104541.

FU J M, SHENG G Y, XU J Y, et al., 1990. Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 16 (4-6): 769-779.

FU S, LIU Z, ZHANG Y M, et al., 2019a. Depositional systems and sequence stratigraphy of mesozoic lacustrine rift basins in NE China: A case study of the Wulan-Hua sag in the southern Erlian Basin [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 174: 68-98.

FU S, LIU Z, ZHANG Y M, et al., 2019b. Source rocks geochemistry and oil-source correlation in the Aershan and first member of Tengge'er formations of the Wulan-Hua sag in south of Erlian Basin, Northeastern China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 182: 106334.

GRANTHAM P J, 1986. The occurrence of unusual  $C_{27}$  and  $C_{29}$  sterane predominances in two types of Oman crude oil [J]. *Organic Geochemistry*, 9 (1): 1-10.

GUO Y Y, LIANG M L, WANG Z X, et al., 2019. Organic geochemistry and mineral composition characteristics in shales of Niutitang Formation, Northwestern Hunan [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (3): 392-399. (in Chinese with English abstract)

JOHNSON C L, GREENE T J, ZINNIKER D A, et al., 2003. Geochemical characteristics and correlation of oil and nonmarine source rocks from Mongolia [J]. *AAPG Bulletin*, 87 (5): 817-846.

LIANG D G, ZENG X Z, WANG X P, et al., 2001. Petroleum origin in the Jizhong depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)

LUO M X, XIA Y T, SHAO X M, et al., 2019. Geochemical characteristics and origin of oil from different strata in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 41 (6): 849-854. (in Chinese with English abstract)

MI J K, ZHANG S C, CHEN J P, et al., 2008. Carbon isotope characteristics and the influencing factors of the oils from Lunnan and Hadexun oil fields [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (6): 1071-1076. (in Chinese with English abstract)

PENG Y, XIONG J Y, XIE J P, et al., 2019. Analysis on accumulation controlling factors of Andesite in Wulanhua Sag of Erlian Basin [J]. *Oil & Gas Exploration and Development*, 37 (4): 83-89. (in Chinese with English abstract)

PEPPER A S, CORVI P J, 1995. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 12 (3): 291-319.

PETERS K E, MOLDOVAN J M, 1983. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

PETERS K E, KONTOROVICH A E, MOLDOVAN J M, et al., 1993. Geochemistry of selected oils and rocks from the central portion of the West Siberian basin, Russia [J]. *AAPG Bulletin*, 77 (5):



863-887.

PETERS K E, MOLDOVAN J M, 1993. The biomarker guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall.

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

SOFER Z, 1988. Biomarkers and carbon isotopes of oils in the Jurassic Smackover Trend of the Gulf Coast States, U. S. A. [J]. Organic Geochemistry, 12 (5): 421-432.

SPIGOLON A L D, LEWAN M D, DE BARROS PENTEADO H L, et al., 2015. Evaluation of the petroleum composition and quality with increasing thermal maturity as simulated by hydrous pyrolysis: A case study using a Brazilian source rock with Type I kerogen [J]. Organic Geochemistry, 83-84: 27-53.

TAO S Z, WANG C Y, DU J G, et al., 2015. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 67: 460-467.

TEN HAVEN H L, DE LEEUW J W, RULLKÖTTER J, et al., 1987. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator [J]. Nature, 330 (6149): 641-643.

TISSOT B P, WELTE D H, 1984. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

WANG F Y, FENG W P, GUAN J, et al., 2016. Geochemical assessment of lacustrine tight oil and application [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46 (2): 388-397. (in Chinese with English abstract)

WANG H, WANG F Y, JIANG S Q, et al., 2017. The oil families and their geochemical characteristics in Sanhantala Sag, Erlian Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 29 (2): 36-43. (in Chinese with English abstract)

WANG X, LI L, YU Y, et al., 2013. Study on Paleogeomorphic restoring and structural development history of Wulanhua Sag, Erlian Basin [J]. China Petroleum Exploration, 18 (6): 62-68. (in Chinese with English abstract)

XIAO H, LI M J, YANG Z, et al., 2019. Distribution patterns and geochemical implications of C<sub>19</sub>-C<sub>23</sub> tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments [J]. Geochimica, 48 (2): 161-170. (in Chinese with English abstract)

YANG X D, 2018. The source kitchen and accumulation and migration in Wulanhua Sag of Erlian Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)

YUAN H Q, LIU C L, XIAO Y, et al., 2016. Sedimentary characteristics of Wulanhua sag in Erlian basin [J]. Progress in Geophysics, 31 (5): 2239-2245. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y M, CHEN S G, CUI Y Q, et al., 2018. Lithofacies distribution and reservoir prediction of andesite in Wulanhua Sag,

Erlian Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 30 (6): 1-9. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L, WANG Z X, LI H J, et al., 2018. Accumulation pattern of organic matter in shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, Chuandong-Wulingshan Area [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 617-626. (in Chinese with English abstract)

ZUMBERGE J E, 1987. Prediction of source rock characteristics based on terpane biomarkers in crude oils: A multivariate statistical approach [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51 (6): 1625-1637.

## 附中文参考文献

程志强, 王飞宇, 江涛, 等, 2018. 二连盆地东北部下白垩统烃源岩有机相与生烃特征 [J]. 新疆石油地质, 39 (4): 384-392.

刁帆, 王建伟, 陈晓娜, 等, 2020. 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区油源对比及高蜡油成因 [J]. 石油实验地质, 42 (1): 117-125.

冯伟平, 2018. 二连盆地典型凹陷早白垩世源岩灶分析及意义 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京).

郭永岩, 梁明亮, 王宗秀, 等, 2019. 湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机地球化学与矿物组成特征 [J]. 地质力学学报, 25 (3): 392-399.

梁狄刚, 曾宪章, 王雪平, 等, 2001. 冀中坳陷油气的生成 [M]. 北京: 石油工业出版社.

罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 等, 2019. 塔里木盆地顺北油气田不同层系原油地球化学特征对比及成因分析 [J]. 石油实验地质, 41 (6): 849-854.

米敬奎, 张水昌, 陈建平, 等, 2008. 哈得逊与轮南地区原油碳同位素特征及影响因素 [J]. 沉积学报, 26 (6): 1071-1076.

彭宇, 熊骥禹, 谢近平, 等, 2019. 二连盆地乌兰花凹陷安山岩成藏主控因素分析 [J]. 天然气与石油, 37 (4): 83-89.

王飞宇, 冯伟平, 关晶, 等, 2016. 湖相致密油资源地球化学评价技术和应用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 46 (2): 388-397.

王浩, 王飞宇, 降栓奇, 等, 2017. 二连盆地赛汉塔拉凹陷原油地球化学特征与油族划分 [J]. 岩性油气藏, 29 (2): 36-43.

王鑫, 李玲, 余雁, 等, 2013. 二连盆地乌兰花凹陷古地貌恢复及构造发育史研究 [J]. 中国石油勘探, 18 (6): 62-68.

肖洪, 李美俊, 杨哲, 等, 2019. 不同环境烃源岩和原油中 C<sub>19</sub>~C<sub>23</sub> 三环萜烷的分布特征及地球化学意义 [J]. 地球化学, 48 (2): 161-170.

杨雪迪, 2018. 二连盆地乌兰花凹陷烃源灶与油气成藏 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京).

袁红旗, 刘长利, 肖阳, 等, 2016. 二连盆地乌兰花凹陷沉积特征研究 [J]. 地球物理学进展, 31 (5): 2239-2245.

张以明, 陈树光, 崔永谦, 等, 2018. 二连盆地乌兰花凹陷安山岩岩相展布及储层预测 [J]. 岩性油气藏, 30 (6): 1-9.

周磊, 王宗秀, 李会军, 等, 2018. 川东—武陵山地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机质富集模式 [J]. 地质力学学报, 24 (5): 617-626.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

