

## 吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩地球化学特征

朱志立<sup>1,2</sup>,程宏岗<sup>3</sup>,张敏<sup>1,2</sup>,王德海<sup>4</sup>,仲泉城<sup>5</sup>,李谨<sup>1,2,3</sup>,李佳阳<sup>1,2</sup>

(1.长江大学 油气资源与勘查技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;2.长江大学 地球环境与水资源学院,湖北 武汉 430100;3.中国石油勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007;4.吉林大学 地球科学学院,吉林 长春 130061;5.西南石油大学 地球科学与技术学院,四川 成都 610500)

**摘要:**通过对吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩野外露头的系统采样,剖析烃源岩的地球化学特征,探讨烃源岩有机质的母质来源、沉积环境和热演化程度。研究表明,有机质母质来源既有高等植物的来源,还有细菌和藻类等低等水生生物的混入;具有典型湖相烃源岩的分布特征;烃源岩形成于半咸水还原的沉积环境,热演化程度为成熟-高成熟阶段。

**关键词:**吉林市;上二叠统;杨家沟组;烃源岩;地球化学特征

中图分类号:P596

文献标识码:A

## Geochemical characteristics of source rocks from Upper Permian Yangjiagou Formation in Jilin City

ZHU Zhili<sup>1,2</sup>, CHENG Honggang<sup>3</sup>, ZHANG Min<sup>1,2</sup>, WANG Dehai<sup>4</sup>, ZHONG Quancheng<sup>5</sup>, LI Jin<sup>1,2,3</sup>, LI Jiayang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technology for Oil and Gas Research, Yangtze University, Hubei Wuhan, 430100, China; 2. School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Hubei Wuhan, 430100, China; 3. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Hebei Langfang, 065007, China; 4. College of Earth Science, Jilin University, Jilin Changchun, 130061, China; 5. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu, 610500, China)

**Abstract:** Based on the GC-MS, the variation of organic matter origin, deposition environment and thermal maturity of hydrocarbon source rocks were systematically discussed. The distribution of tricyclic terpane is normal distribution with the main peak of C<sub>23</sub>, high content C<sub>24</sub> tetracyclic terpane and a predominance of C<sub>27</sub>ααα20R sterane over C<sub>29</sub>ααα20R sterane with asymmetry "V" distribution indicates that the organic material of source rocks are higher terrigenous plants mixed with lower aquatic organisms. The main peak of hopanes is C<sub>30</sub> hopane with the distribution of C<sub>31</sub>-C<sub>35</sub> hopane decline as a ladder and the tricyclic terpane/hopane ratio is high shows the lacustrine facies characteristics. The Pr/Ph value (0.44~0.49) and gammacerane/C<sub>30</sub> hopane value (0.32~0.38) indicate that source rocks are developed in brackish water reductive semideep-deep lake environment. The maturity parameters of C<sub>29</sub>ααα20S/(20S+20R), C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ) and C<sub>31</sub>αβ22S/(22S+22R) have reached the balanced endpoint value of isomerization, indicating the source rocks stay in mature-high mature stage during the thermal evolution.

**Key words:** the Upper Permian; Yangjiagou Formation; source rocks; geochemical characteristics

松辽盆地及外围地区油气资源丰富,但对上古生界油气地质研究和勘探程度均较低,资源前景广阔<sup>[1-4]</sup>。近年来,在开展“松辽盆地及外围上

古生界油气资源战略选区”国家油气资源选区项目研究中发现,晚古生代地层在东北地区广泛分布且未发生区域变质作用,自下而上发育了多套

烃源岩层,具有较好的油气前景,吉中地区的上二叠统杨家沟组发育的黑色泥岩厚度较大,为其中一套烃源岩层<sup>[5-8]</sup>。然而,前人对杨家沟组的研究较少,研究内容也主要集中在沉积环境方面,张兴洲等认为杨家沟组为海陆交互相磨拉石建造及碳酸盐岩建造<sup>[9]</sup>;王德海等认为杨家沟组以陆相沉积为主,局部有海侵环境沉积<sup>[10]</sup>;而对杨家沟组烃源岩的有机质丰度、类型和成熟度的烃源岩地球化学特征研究较少,从生物标志化合物的角度探讨杨家沟组烃源岩的性质更是鲜有报道。鉴于此,本文对吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩系统的取样,揭示其中包含的有机质生源、沉积环境和成熟度等地质及地球化学特征,为松辽盆地及外围地区油气基础地质研究提供借鉴意义。

## 1 样品与实验分析

在吉中地区,杨家沟组出露较好。吉林市杨家沟组剖面位于新开的环城公路二道沟附近,剖面起点坐标为北纬 43°52′29.8″,东经 126°41′37.1″;剖面终点坐标为北纬 43°50′3.7″,东经 126°39′56.8″,剖面长度 3.1 km,泥岩厚度 1 666.7 m,出露良好,为人工露头。杨家沟组按照岩性分为上下两段,底部为构造角砾岩;下段主要为砾岩,砾石为近源的碳酸盐岩;上段主要为黑色灰黑色泥板岩、泥岩和页岩,夹有粉砂岩薄层<sup>[10]</sup>。样品采于吉林市杨家沟组剖面,岩性主要为黑色泥岩,共采集了 13 个样品,全部样品进行有机碳含量、全岩显微组分、镜质体反射率等分析之后,从中选取 4 个样品进行饱和烃色谱-质谱分析。

将样品清洗风干后碎至 100 目,然后以三氯甲烷作溶剂采用索氏抽提法提取样品中的可溶有机质,并用正己烷沉淀沥青 A 中的沥青质,而后采用硅胶/氧化铝柱层法把脱沥青质沥青分离成饱和烃、芳香烃和非烃。然后对饱和烃馏分进行色谱质谱分析。

饱和烃色谱-质谱分析条件:仪器为惠普公司 5890 台式质谱仪,色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。升温程序:50℃ 恒温 2 min,从 50℃ 至 100℃ 的升温速率为 20℃/min,100℃ 至 310℃ 的升温速率 3℃/min,310℃ 恒温 15.5 min。进样室温度 300℃,载气为氮气,流速为 1.04 mL/min,扫描范围为 50 ~ 550 amu。检测方式为全扫描:电离能量为 70 eV,离子源温度 230℃。

## 2 烃源岩基础地球化学特征

吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩有机碳含量较高,TOC 分布范围为 0.52% ~ 1.66% (表 1),依据烃源岩中有机质丰度的评价标准,它们均可归入烃源岩的范畴,有机质  $R_o$  为 4.62% ~ 5.37%,处于高-过成熟阶段。依据干酪根有机显微组分类型指数,烃源岩有机质类型为 III。但是,与较高的有机碳含量形成鲜明对照的是这些烃源岩中有机质的热解烃量(S2)、生烃潜量(S1 + S2)和氢指数(HI)及沥青 A 含量都异常偏低,这一现象与这些烃源岩所经历的高热演化程度是分不开的,同时也与露头样品受风化作用有关,生烃潜力较低<sup>[11]</sup>。有研究表明<sup>[12]</sup>,对于高-过成熟演化阶段的烃源岩有机质丰度的评价,沥青 A、总烃含量(HC)、S1 + S2 等评价指标已经失去了原有效果,而 TOC 对于有机质丰度的判别依然是可靠的。

## 3 饱和烃生物标志化合物特征

### 3.1 正构烷烃和类异戊二烯烷烃

正构烷烃是饱和烃馏分中的主要成份,蕴含着丰富的地球化学信息,其分布模式、奇偶优势以及轻重比可用于指示生烃母质、热演化特征和生物降解等信息<sup>[13]</sup>。烃源岩中正构烷烃含量较低,其分布模式大体相同,正构烷烃呈单峰前峰型分布(图 1(a))。正构烷烃的碳数分布范围为  $C_{15} \sim C_{32}$ ,主峰碳为  $C_{18}$ ,轻重比  $\sum nC_{21} - / \sum nC_{22} +$  高,为 2.08 ~ 6.45,  $nC_{21} + nC_{23} / nC_{28} + nC_{29}$  比值高,为 2.67 ~ 7.60(表 2),低碳数的正构烷烃含量相对较高,可能因为高过成熟阶段碳-碳键的断裂占据主导地位,此时高分子量正构烷烃会转变成低分子量化合物,结果导致低分子量成员占优势的单峰态分布<sup>[14]</sup>。CPI 和 OEP 的分布范围分别为 1.13 ~ 1.33 和 0.75 ~ 0.88,均接近于 1,无明显的奇偶优势,表明烃源岩的热演化程度较高。姥鲨烷与植烷是类异戊二烯烷烃中常用表征源岩沉积环境的标志化合物<sup>[15]</sup>,杨家沟组烃源岩 Pr/Ph 较低,为 0.44 ~ 0.49,有明显的植烷优势,表明烃源岩中有机质沉积于还原环境,有利于有机质的保存。

### 3.2 三环萜烷和四环萜烷系列

$C_{19} - C_{20}$  低碳数三环萜烷主要来源于高等植物,而  $C_{26} +$  长链三环萜烷可能来源于菌藻类等低

等水生生物<sup>[16]</sup>;丰富的四环萜烷表征陆源母质的输入<sup>[13]</sup>。三环萜烷在不同沉积环境中分布不同,一般湖相和海相来源呈正态分布,而煤系地层中则表现为 C<sub>19</sub> - C<sub>26</sub> 阶梯状递减<sup>[17-18]</sup>。杨家沟组烃源岩中三环萜烷系类含量与藿烷的含量大体相当,三环萜烷/藿烷的比值介于 0.57 ~ 1.38 之间,绝大部分均大于 1。三环萜烷的分布特征基本相同,呈以 C<sub>23</sub> 为主峰碳的似正态分布(图 1(b)),样品中还检测到 C<sub>24</sub> 四环萜烷,其丰度略低于 C<sub>26</sub> 三环萜烷,表现出湖相的分布模式。上述参数研究

表明上二叠统杨家沟组烃源岩中有机质既有高等植物的来源,还有细菌和藻类等低等水生生物的混入,为混合型母质。

### 3.3 五环三萜系列

五环三萜系列化合物包括藿烷类化合物、伽马蜡烷、和其他如羽扇烷等非藿烷系类化合物,其分布形式蕴含许多地质及地球化学信息。杨家沟组烃源岩中的五环三萜类化合物分布特征大体相

表 1 吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩基础地球化学数据

Tab.1 Basic geochemical data of source rocks from Yangjiagou Formation of Upper Permian in Jilin

| 井号        | 岩性   | TOC<br>/% | S2<br>/mg · g <sup>-1</sup> | S1 + S2<br>/mg · g <sup>-1</sup> | HI/m<br>g · g <sup>-1</sup> | 沥青 A/%  | 类型<br>指数 | 有机质<br>类型 | Ro<br>/% |
|-----------|------|-----------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|----------|-----------|----------|
| JL-2-1    | 黑色泥岩 | 1.66      | 0.06                        | 0.10                             | 3                           | 0.002 1 | -60.76   | Ⅲ         | 4.62     |
| JL-2-2    | 黑色泥岩 | 0.84      | 0.02                        | 0.04                             | 2                           | 0.002 2 | -58.61   | Ⅲ         | -        |
| JL-2-3    | 黑色泥岩 | 0.76      | 0.03                        | 0.06                             | 4                           | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-4    | 黑色泥岩 | 0.79      | 0.05                        | 0.22                             | 5                           | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-5    | 黑色泥岩 | 0.63      | 0.02                        | 0.06                             | 3                           | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-6    | 黑色泥岩 | 0.89      | 0.02                        | 0.04                             | 2                           | 0.001 3 | -55.69   | Ⅲ         | 5.27     |
| JL-2-7    | 黑色泥岩 | 1.00      | 0.01                        | 0.04                             | 2                           | 0.001 6 | -63.72   | Ⅲ         | 5.28     |
| JL-2-8    | 黑色泥岩 | 0.52      | 0.11                        | 0.25                             | 15                          | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-9    | 黑色泥岩 | 0.73      | 0.02                        | 0.05                             | 2                           | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-10-1 | 炭质泥岩 | 1.08      | 0.02                        | 0.05                             | 2                           | 0.003 7 | -63.72   | Ⅲ         | 5.29     |
| JL-2-10-2 | 炭质泥岩 | 0.74      | 0.02                        | 0.06                             | 2                           | -       | -        | -         | -        |
| JL-2-11   | 泥岩   | 1.28      | 0.02                        | 0.06                             | 2                           | 0.003 4 | -62.41   | Ⅲ         | 5.28     |
| JL-2-12   | 泥岩   | 0.81      | 0.02                        | 0.08                             | 2                           | 0.004 7 | -62.41   | Ⅲ         | 5.37     |

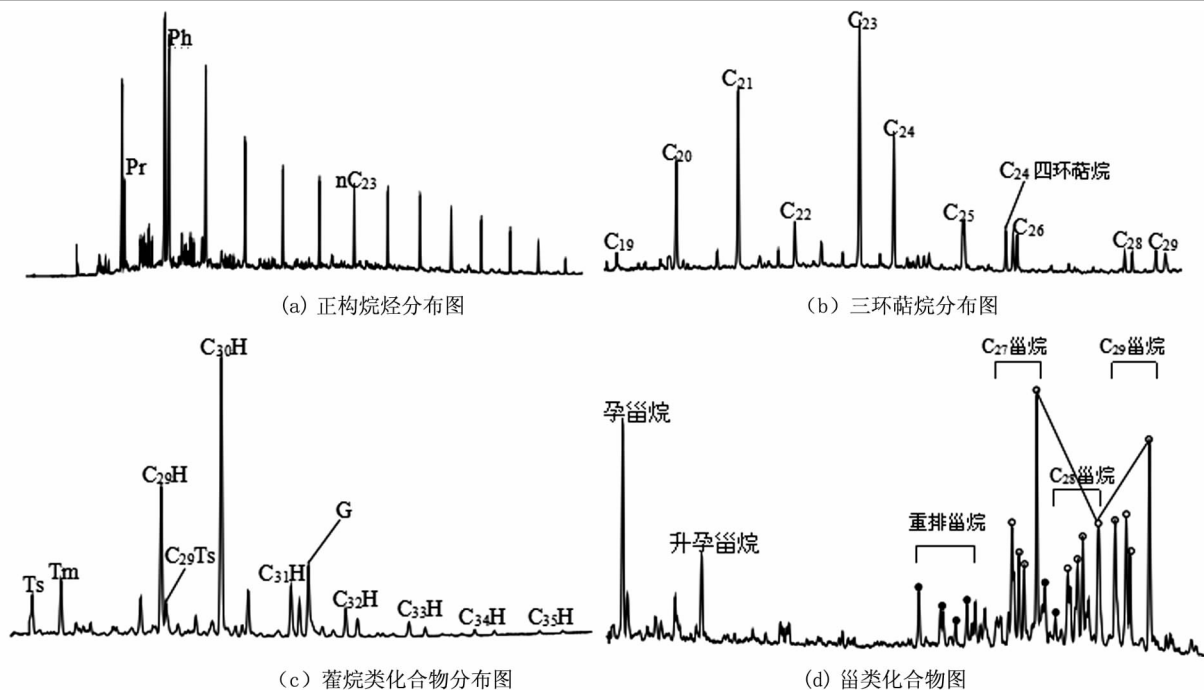


图 1 吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩部分生物标志化合物色谱质谱图

Fig.1 Part of biomarker compounds GC-MS chromatogram of source rocks from Yangjiagou Formation of Upper Permian in Jilin

表2 吉林市上二叠统杨家沟组烃源岩生物标志化合物参数表

Tab. 2 Parameters of biomarkers of source rocks from Yangjiagou Formation of Upper Permian in Jilin

| 地球化学参数  | JL-2-1 | JL-2-2 | JL-2-11 | JL-2-12 |
|---|--------|--------|---------|---------|
|   | 黑色泥岩   | 黑色泥岩   | 泥岩      | 泥岩      |
| 正构烷烃主峰碳数  | nC18   | nC18   | nC18    | nC18    |
| <i>CPI</i>  | 1.31   | 1.13   | 1.33    | 1.22    |
| <i>OEP</i>  | 0.84   | 0.83   | 0.75    | 0.88    |
| Pr/Ph   | 0.46   | 0.44   | 0.47    | 0.49    |
| Pr/nC <sub>17</sub>   | 0.87   | 0.81   | 0.93    | 0.85    |
| Ph/nC <sub>18</sub>   | 1.39   | 1.31   | 1.4     | 1.39    |
| $\Sigma nC_{21} - / \Sigma nC_{22} +$   | 3.09   | 2.08   | 6.45    | 2.18    |
| $(nC_{21} + nC_{22}) / (nC_{28} + nC_{29})$                                       | 4.52   | 2.67   | 7.6     | 3.46    |
| C <sub>24</sub> 四环萜烷/C <sub>26</sub> 三环萜烷   | 0.56   | 0.55   | 0.55    | 0.52    |
| 三环萜烷/藿烷   | 1.2    | 1.29   | 1.38    | 0.57    |
| Ts/Tm   | 0.72   | 0.73   | 0.76    | 0.63    |
| C <sub>29</sub> Ts/C <sub>29</sub> H  | 0.31   | 0.31   | 0.33    | 0.26    |
| G/C <sub>30</sub> H   | 0.34   | 0.33   | 0.32    | 0.38    |
| C <sub>35</sub> /C <sub>34</sub> 升藿烷  | 0.53   | 0.53   | 0.63    | 0.54    |
| 三环萜烷/17 $\alpha$ -藿烷  | 1.52   | 1.64   | 1.76    | 0.7     |
| C <sub>30</sub> dia-H/C <sub>30</sub> H   | 0.06   | 0.06   | 0.06    | 0.04    |
| C <sub>31</sub> $\alpha\beta$ 22S/(22S+22R)                                       | 0.61   | 0.6    | 0.6     | 0.61    |
| C <sub>29</sub> $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20S+20R)                                | 0.55   | 0.56   | 0.57    | 0.55    |
| C <sub>29</sub> $\alpha\beta\beta$ /( $\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$ ) | 0.62   | 0.63   | 0.62    | 0.63    |
| C <sub>27</sub> 重排甾烷/C <sub>27</sub> 规则甾烷   | 0.28   | 0.29   | 0.28    | 0.27    |
| C <sub>27</sub> /C <sub>29</sub> 规则甾烷   | 1.12   | 1.16   | 1.13    | 1.18    |
| (孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷   | 0.17   | 0.19   | 0.2     | 0.16    |
| 甾烷/藿烷   | 1.15   | 1.16   | 1.16    | 1.17    |

似,以 C<sub>30</sub>藿烷为主峰,C<sub>31</sub>-C<sub>35</sub>升藿烷系类列化合物含量较低,且呈阶梯状依次递减(图 1(c)),具有典型湖相烃源岩的分布特征。伽马蜡烷常出现在高盐度的海相和非海相沉积物中,一般认为是高盐度的指标,同时也代表了沉积水体的分层现象<sup>[19]</sup>,C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub>升藿烷为有机质沉积期间及以后氧化还原电位的指标<sup>[13]</sup>。杨家沟组烃源岩伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷比值为 0.32 ~ 0.38,表明有机质沉积水体盐度较高,为半咸水的沉积环境。烃源岩 C<sub>35</sub>升藿烷/C<sub>34</sub>升藿烷较高,为 0.53 ~ 0.63(表 2),暗示有机质为还原的沉积环境。烃源岩中重排藿烷的含量低,C<sub>30</sub>重排藿烷/C<sub>30</sub>藿烷比值为 0.04 ~ 0.06,一般认为高含量的重排藿烷指示着氧化条件下黏土矿物催化作用<sup>[18]</sup>,杨家沟组烃源岩低含量的重排藿烷与还原的沉积环境相关。C<sub>31</sub> $\alpha\beta$ 22S/(22S+22R)比值为藿烷中应用最广泛的评价成熟度的参数<sup>[13]</sup>,杨家沟组烃源岩中该比值为 0.60 ~ 0.61,已经达到平衡值 0.6,显示烃源岩已进入生油门限,成熟作用导致的异构化已达到平衡。

### 3.4 甾类化合物

烃源岩中甾烷化合物的分布蕴含着较丰富的有机质来源、沉积环境以及成熟度等信息。一般认为,陆生高等植物富含 C<sub>29</sub>甾烷,低等水生生物富含 C<sub>27</sub>和 C<sub>28</sub>甾烷<sup>[13]</sup>。杨家沟组烃源岩中甾烷类化合物分布模式大体相同,C<sub>27</sub>规则甾烷含量最高,C<sub>29</sub>规则甾烷次之,C<sub>28</sub>规则甾烷含量相对较低,C<sub>27</sub>/C<sub>29</sub>规则甾烷为 1.12 ~ 1.18,C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>和 C<sub>29</sub> $\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷总体呈近“V”字形分布(图 1(d)),表明烃源岩生烃母质陆源高等植物的输入,同时也有以低等水生生物贡献。C<sub>29</sub> $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20S+20R)和 C<sub>29</sub> $\alpha\beta\beta$ /( $\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$ )是应用最广泛的评价成熟度的生物标志化合物<sup>[13]</sup>,杨家沟组烃源岩 C<sub>29</sub> $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20S+20R)为 0.55 ~ 0.57,C<sub>29</sub> $\alpha\beta\beta$ /( $\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$ )为 0.62 ~ 0.63,C<sub>29</sub> $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20S+20R)均大于 0.55,均已达平衡值终点值,根据黄第藩划分标准<sup>[20]</sup>,杨家沟组烃源岩处于高成熟-过成熟阶段。研究表明,孕甾烷和升孕甾烷与成熟度关系密切,后生孕甾烷和升孕甾烷是规则甾烷热降解的产物,富含黏土矿物、酸性氧化的环境

有助于重排甾烷的形成<sup>[13]</sup>。杨家沟组烃源岩中孕甾烷和升孕甾烷含量较高,(孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷为0.16~0.20,是由于烃源岩处于高演化阶段所致,而重排甾烷的含量较低, $C_{27}$ 重排甾烷/ $C_{27}$ 规则甾烷为0.27~0.29,可能与还原的沉积环境不利于重排甾烷的形成有关。甾烷与藿烷的比值可指示真核生物(主要是藻类和高等植物)与原核生物(细菌)对源岩的贡献<sup>[13]</sup>,杨家沟组烃源岩中甾烷/藿烷的比值为1.15~1.17,表明藻类和细菌对有机质的贡献大致相当。

#### 4 结论

1) 杨家沟组烃源岩中正构烷烃为单峰前峰型,低碳数的正构烷烃较高,为烃源岩处于高成熟-过成熟阶段所致;三环萜烷呈以 $C_{23}$ 为主峰碳似正态分布,富含 $C_{24}$ 四环萜烷, $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 和 $C_{29}$ ααα20R甾烷呈近“V”字形分布,有机质既有高等植物的来源,还有细菌和藻类等低等水生生物的混入,为混合型母质。

2) 烃源岩中三环萜烷呈以 $C_{23}$ 为主峰碳的似正态分布,藿烷以 $C_{30}$ 藿烷为主峰, $C_{31}$ ~ $C_{35}$ 升藿烷系列化合物含且呈阶梯状依次递减,三环萜烷/藿烷比值较高,为0.57~1.38,具有典型湖相烃源岩的分布特征;Pr/Ph和 $C_{35}$ 升藿烷/ $C_{34}$ 升藿烷分别为0.44~0.49和0.53~0.63,暗示沉积水体较深,环境较还原,为半深湖-深湖沉积环境;伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷比值为0.32~0.38,烃源岩为半咸水的沉积环境。

3) 烃源岩中CPI和OEP分别为1.13~1.33和0.75~0.88,具有较明显成熟特征, $T_s/T_m$ 和 $C_{29}T_s/C_{29}17\alpha(H)$ -藿烷比值较高, $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 和 $C_{31}\alpha\beta 22S/(22S+22R)$ 均到达异构化终点的平衡值,说明烃源岩热演化程度为成熟-高成熟阶段。

#### 参考文献:

- [1] 任收麦,乔德武,张兴洲,等. 松辽盆地及外围上古生界油气资源战略选区研究进展[J]. 地质通报,2011,30(2):197-204.
- [2] 张抗. 中国大北方上古生界油气勘探新领域[J]. 地质通报,2011,30(6):803-810.
- [3] 黄志龙,王斌,张秀顺,等. 松辽盆地上古生界烃源岩生气潜力评价[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(3):55-65.
- [4] 李艳,张秀顺,逯晓喻,等. 松辽盆地上古生界烃源岩特征及有效性分析[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(4):39-48.
- [5] 张永生,王延斌,卢振权,等. 松辽盆地及外围地区石炭系-二叠系烃源岩的特征[J]. 地质通报,2011,30(2):214-220.
- [6] 张兴洲,乔德武,迟效国,等. 东北地区晚古生代构造演化及其石油地质意义[J]. 地质通报,2011,30(2):205-213.
- [7] 唐友军,马忠梅,蒋兴超. 内蒙古扎鲁特盆地陶海营子剖面林西组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. 地质通报,2013,32(8):1315-1321.
- [8] 王德海,谭文文,徐文世,等. 东北佳木斯-内蒙古地区中二叠世岩相古地理研究[J]. 地学前缘,2011,18(4):41-51.
- [9] 张兴洲,周建波,迟效国,等. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(5):719-725.
- [10] 王德海,谢宏坤,温泉波,等. 吉林市上二叠统杨家沟组沉积环境[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(Z1):162-168.
- [11] 谢青,江宽,耿进卫. 关于碳酸盐岩生油潜力的研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(1):74-89.
- [12] 程青松,龚建明,张敏,等. 祁连山冻土区木里三叠系烃源岩地球化学特征[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(4):84-89.
- [13] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDWAN J M. The biomarker guider[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [14] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum Formation and Occurrence[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [15] TEN HAVEN H L, DE LEEUW J W. Restricted utility of pristane/phytane ratio as palaeoenvironmental indicator[J]. Nature, 1987(330):641-643.
- [16] BARNERS M A, BARBERS W C. Oxidic and anoxic diagenesis of diterpenes in lacustrine sediments. Bjoroy M. Advances in Organic Geochemistry [J]. Chichester: John Wiley, 1983:289-298.
- [17] 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.
- [18] 包建平,朱翠山,倪春华. 北部湾盆地不同四陷原油生物标志化合物分布与组成特征[J]. 沉积学报,2007,25(4):646-652.
- [19] 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.
- [20] 黄第藩,张大江,李晋超,等. 柴达木盆地第三系油源对比[J]. 沉积学报,1989,7(2):1-13.

(责任编辑 王利君)