

## 辽西金羊盆地北票组一类新的油砂地球化学特征及意义

孙 鹏, 唐友军, 张 坤

长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100

**摘 要:** 金羊盆地章吉营子凹陷西缘的 SZK04 井北票组发现了油气显示, 有机地球化学分析结果显示该类油砂具有姥植比低、藿烷系列化合物丰富、伽马蜡烷含量较高、甾烷系列化合物缺失且碳同位素较轻的特征. 综合生物标志化合物及组分碳同位素认为, SZK04 井油砂应为海相还原环境沉积的烃源岩贡献, 且有机质的来源应以细菌输入为主. 结合本区地质背景, 认为该类海相油砂可能来自中新元古界烃源岩, 这为金羊盆地乃至辽西地区的中新元古界油气勘探提供了依据.

**关键词:** 金羊盆地; 北票组; SZK04 井; 油砂; 生物标志化合物; 辽宁省

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.04.0005

## A NEW TYPE OF OIL SANDS IN THE BEIPIAO FORMATION OF JINYANG BASIN, WESTERN LIAONING PROVINCE: Geochemical Characteristics and Geological Implication

SUN Peng, TANG You-jun, ZHANG Kun

School of Resource and environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

**Abstract:** The occurrence of oil and gas is discovered in the Beipiao Formation of SZK04 well located on the western margin of Zhangjiyingzi Sag in Jinyang Basin. The organic geochemical analysis results show that such oil sands are characterized by low pristane-phytane ratio, abundant hopane compounds, high gammacerane content, deficiency of sterane compounds and light carbon isotopes. Combined with the biomarker compounds and carbon isotope values, it is believed that the source rocks deposited in marine reduction environment should contribute to the oil sands of SZK04 well, with the organic matter mainly from bacterial input. Considering the geological background of the area, it is concluded that the type of marine oil sands may come from the Mesoproterozoic source rocks, which provides a basis for the Mesoproterozoic oil and gas exploration in Jinyang Basin and even the western Liaoning Province.

**Key words:** Jinyang Basin; Beipiao Formation; SZK04 well; oil sand; biomarker compound; Liaoning Province

### 0 引言

松辽盆地外围油气地质基础调查成果显示, 东北

地区下—中侏罗统含煤层系是具有潜力的油气勘探新领域<sup>[1-3]</sup>. 辽西地区的金岭寺—羊山盆地(简称金羊盆

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-05-10. 编辑: 黄欣、张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽外围南部盆地群油气基础地质调查”(DD20160167); “冀北—辽西中新元古界油气地质调查”(DD20190098); “松辽盆地核心目标区页岩油参数获取”(DD20160163).

作者简介: 孙鹏(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事地质勘探综合研究, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路 1 号, E-mail//P\_Sun@yangtzeu.edu.cn

通信作者: 唐友军(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事油气地球化学研究, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号, E-mail//309378729@qq.com

地),是东北地区下一中侏罗统含煤层系发育最完备的地区之一<sup>[4]</sup>.新一轮的油气基础地质调查成果揭示盆地内北票组是一套优质生烃层系,其暗色泥岩厚度约为800 m,是盆地内的主要含煤层系,也是生油的有利层段<sup>[5]</sup>.针对北票组烃源岩的生烃潜力与地球化学指标,前人已有大量研究,认为北票组有机碳含量高,为中等一好烃源岩;干酪根母质类型以腐殖组为主,是Ⅲ型干酪根;镜质体反射率在1.0%左右.已发现的原油、油砂均来自北票组烃源岩的贡献<sup>[5-12]</sup>.但是,在对金羊盆地西侧SZK04井北票组有机地球化学特征研究过程中,发现了一类与已报道的原油生物标志化合物及原油碳同位素有明显差异的油砂,虽然分析的这类油砂样品较少,但它所代表的地球化学意义值得关注与思考.本文将重点分析这类油砂的地球化学特征,探

讨其地球化学意义以及母岩,以期为金羊盆地下一步的油气勘探提供依据.

### 1 地质背景

金羊盆地位于辽西地区,构造上位于燕辽造山带东部,面积约为7340 km<sup>2</sup>.盆地内主要出露中生代地层,仅在东、西边界附近见古生界和中一新元古界.金羊盆地是东北地区侏罗纪地层发育最完备的盆地之一,自上而下依次发育上侏罗统土城子组,中侏罗统髫髻山组、海房沟组,下侏罗统北票组、兴隆沟组.

SZK04井位于金羊盆地西侧,属于章吉营子凹陷西北部(图1a、b),该井开孔为北票组灰色砂岩,自上而下钻遇北票组和雾迷山组(图1c).在215.6~228 m井段,北票组角砾岩岩心中发现油斑级别的油气显示.

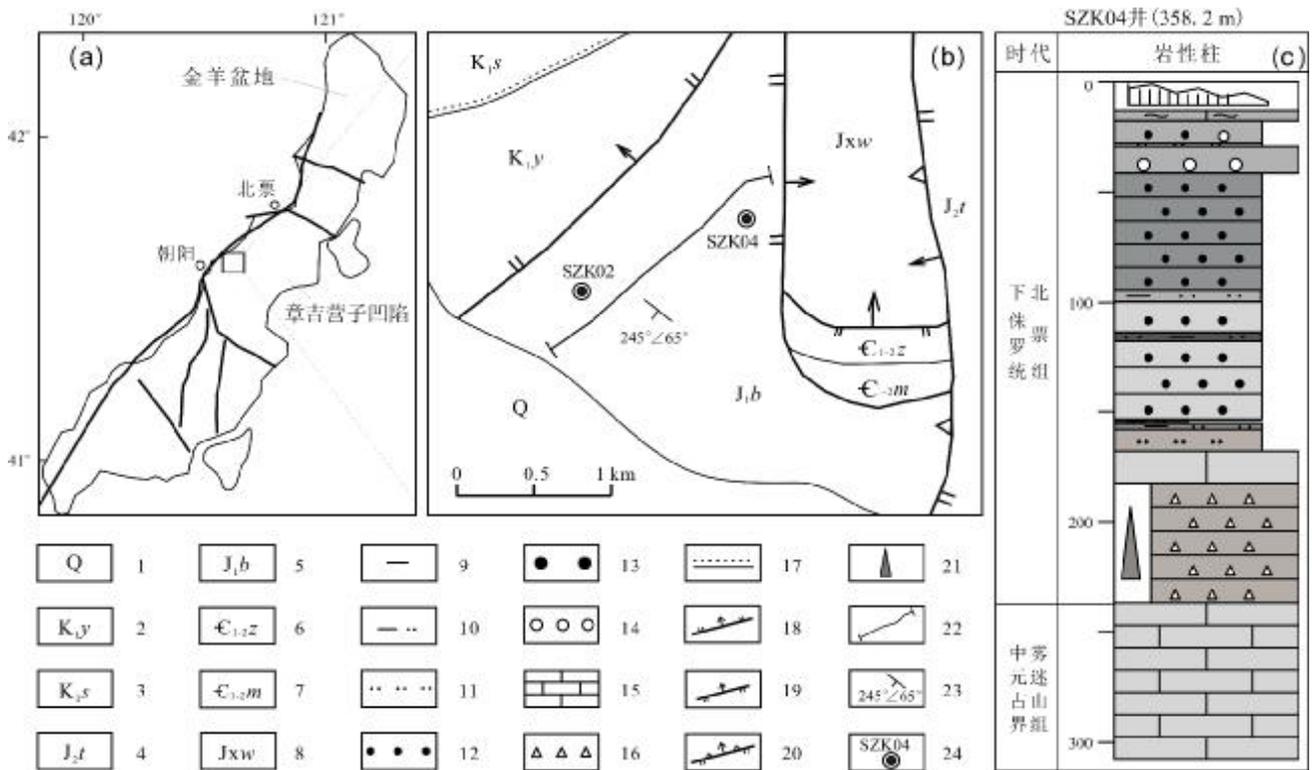


图1 金羊盆地构造简图及SZK04井柱状图

(据文献[10, 13])

Fig. 1 Structural sketch map of Jinyang Basin and stratigraphic column of SZK04 well

(From References [10, 13])

- 1—第四系 (Quaternary); 2—义县组 (Yixian fm.); 3—沙海组 (Shahai fm.); 4—土城子组 (Tuchengzi fm.); 5—北票组 (Beipiao fm.); 6—张夏组 (Zhangxia fm.); 7—馒头组 (Mantou fm.); 8—雾迷山组 (Wumishan fm.); 9—泥岩 (mudstone); 10—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 11—粉砂岩 (siltstone); 12—中砂岩 (medium sandstone); 13—粗砂岩 (coarse sandstone); 14—砾岩 (conglomerate); 15—灰岩 (limestone); 16—角砾岩 (breccia); 17—平行不整合 (parallel unconformity); 18—正断层 (normal fault); 19—逆断层 (reverse fault); 20—逆冲推覆断层 (thrust nappe fault); 21—油斑 (oil spot); 22—剖面位置 (section location); 23—岩层产状 (stratigraphic occurrence); 24—井位 (well location)

## 2 样品来源与实验分析

### 2.1 样品来源

本研究新发现的油砂样品取自金羊盆地 SZK04 井 215~230 m 砾岩岩心段中. 为明确新发现油砂的特殊性, 选取文献报道的金羊盆地 SZK02 井油砂<sup>[7]</sup>、羊 D1 井油砂<sup>[9]</sup>、冠山矿区北票组原油<sup>[11]</sup>、北票组烃源岩<sup>[3, 12]</sup>一起讨论.

### 2.2 实验分析方法

样品采用超声抽提法, 选取油斑、油浸显示的部位敲碎后置于圆底烧瓶中, 加入氯仿, 连续超声 6 h, 获得氯仿沥青“ A”. 沉淀沥青质后, 用柱层析法对饱和烃、芳烃、非烃进行族组分离. 对分离出的饱和烃和芳烃分别进行饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱和碳同位素的测定, 实验设备及分析条件见文献<sup>[14-15]</sup>.

## 3 生物标志化合物分布与组成特征

### 3.1 链烷烃系列的分布与组成特征

链烷烃系列是原油的重要组成部分, 可以提供有机质来源、沉积环境以及热演化程度等信息<sup>[16]</sup>. 油砂样品中链烷烃系列包括正构烷烃系列和类异戊二烯烷烃系列. SZK04 井两件油砂样品饱和烃总离子流图分布面貌十分相似(图 2), 呈现出前峰型单峰态的分布模式, 其正构烷烃系列没有明显的碳数优势, 碳数范围在 nC<sub>12</sub>—nC<sub>33</sub>, 主峰碳分别为 C<sub>15</sub> 和 C<sub>18</sub>. (nC<sub>21</sub>+nC<sub>22</sub>)/(nC<sub>28</sub>+nC<sub>29</sub>) 分别为 4.48、3.10, 指示有机质来源以低等水生生物为主; 样品 OEP、CPI 均为 1 左右, 无明显的

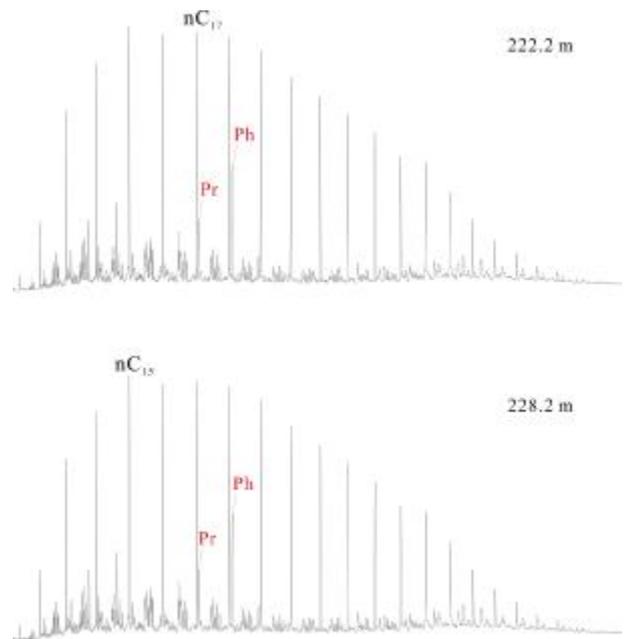


图 2 SZK04 井北票组油砂饱和烃质量色谱图

Fig. 2 Saturated hydrocarbon mass chromatogram of the oil sands from Beipiao Formation of SZK04 well

奇偶优势.

两件油砂样品 Pr/Ph 分别为 0.4、0.35, 显示出一定的植烷优势, 指示较为还原的沉积环境, 这一参数明显与该地区侏罗系烃源岩形成的地质背景不吻合. 而在 SZK02 井和羊 D1 井油砂、冠山矿区北票组原油、北票组烃源岩中该比值基本都大于 2.0(表 1), 代表一种氧化的沉积环境. 原油中姥鲛烷(Pr)、植烷(Ph)与相邻正构烷烃的比值也可以反映其来源与成因<sup>[17]</sup>, 从图 3 中

表 1 金羊盆地北票组油砂饱和烃和烃气相色谱数据

Table 1 Saturated hydrocarbon gas chromatographic parameters of the oil sands from Beipiao Formation

样品编号	CPI	OEP	$\sum nC_{21} / \sum nC_{22}^*$	$(nC_{21}+nC_{22}) / (nC_{28}+nC_{29})$	Pr/nC <sub>17</sub>	Ph/nC <sub>18</sub>	Pr/Ph	主峰碳数
*SZK02-75	1.14	1.06	0.75	2.22	0.17	0.05	3.54	C23
*SZK02-138	1.10	1.20	0.90	1.86	0.15	0.07	2.71	C23
*SZK02-159	1.10	1.04	0.65	1.89	0.16	0.04	3.28	C23
*SZK02-202	1.07	1.07	1.01	2.72	0.15	0.06	2.50	C23
* 冠山煤矿	1.17	-	1.1	3.2	-	-	2.6	C21
* 羊 D1-1	1.16	1.03	0.47	2.68	0.36	0.19	0.73	C21
* 羊 D1-2	1.28	1.02	0.84	5.99	0.49	0.15	0.45	C21
SZK04-222.2	1.21	0.99	2.37	4.48	0.39	0.72	0.60	C15
SZK04-228.2	1.36	0.92	1.17	3.10	0.61	1.30	0.35	C18

\* 据文献<sup>[7-11]</sup>, -为未检测到.

也能明显看出本文研究的油砂样品中两比值明显高于前人报道的指标,彼此间没有交集.由此可见,两者具有不同的母质来源与沉积环境.

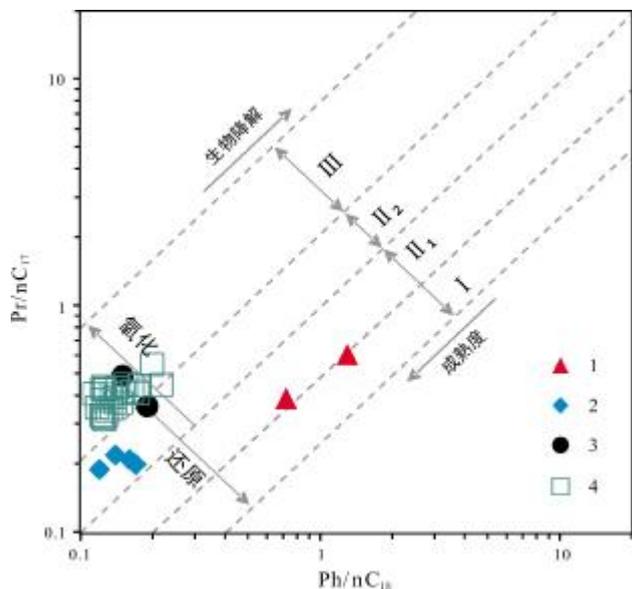


图3 金羊盆地北票组油砂及烃源岩 Pr/nC<sub>17</sub>/Ph/nC<sub>18</sub> 相关关系图 (据文献[17])

Fig. 3 The Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub> diagram of oil sands and source rocks from Beipiao Formation (After Reference [17])

1—SZK04井油砂 (oil sands from SZK04 well); 2—SZK02井油砂 (oil sands from SZK02 well); 3—羊D1井油砂 (oil sands from YD1 well); 4—北票组烃源岩 (source rock of Beipiao fm.)

### 3.2 萜烷系列的分布与组成

SZK04油砂中萜烷系列的分布特征见图4, 两件油砂样品的三环萜烷和藿烷系列分布特征相似, 三环萜烷中以C<sub>23</sub>为主峰, C<sub>24</sub>四环二萜烷含量低; 五环三萜烷系列中以C<sub>30</sub>藿烷为主峰, 升藿烷含量随碳数增加而减少, 检测到一定含量的伽马蜡烷, Ga/C<sub>30H</sub>分别为0.42、0.48. 富伽马蜡烷、贫重排藿烷的特征表明有机质形成于咸水、还原环境<sup>[18]</sup>. 反观已报道的原油及北票组烃源岩中萜烷系列的分布与组成, 三环萜烷中以C<sub>19</sub>、C<sub>20</sub>为主峰, 检测到了丰富的C<sub>24</sub>四环二萜烷, Ga/C<sub>30H</sub>约为0.18, 具有相对丰富的重排藿烷<sup>[3-12]</sup>. 由此可见SZK04井油砂样品的萜烷系列分布和组成与已报道北票组原油及烃源岩的特征不一致.

### 3.3 甾烷系列的分布与组成

甾烷类的生源意义主要反映真核生物(如藻类、浮游动物和高等植物)的贡献, 其分布与组成特征与原始

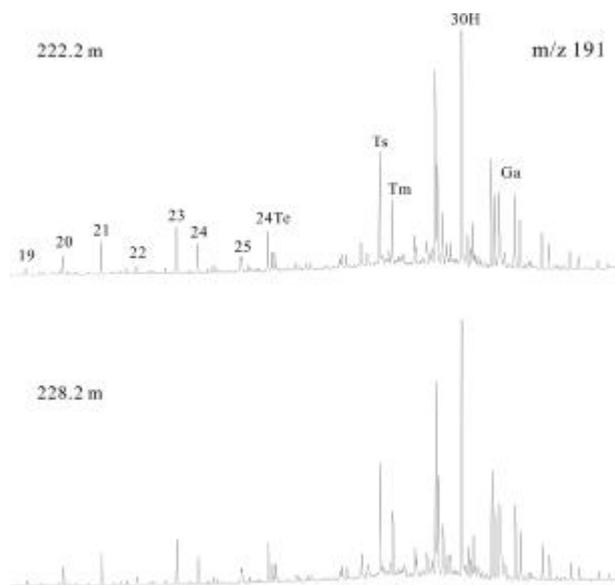


图4 SZK04井北票组油砂样品萜烷质量色谱图  
Fig. 4 Terpane mass chromatogram of the oil sands from Beipiao Formation of SZK04 well

生烃母质来源有关, 同时受沉积环境的性质及水体古盐度的高低也是受控因素<sup>[16]</sup>. 常认为C<sub>27</sub>甾烷来源于低等水生藻类, C<sub>29</sub>甾烷则与陆源高等植物有关<sup>[19]</sup>.

SZK04井油砂样品的甾烷分布缺失了部分规则甾烷且甾烷类生物标志化合物浓度较低(图5). 该特征与已报道的北票组原油及烃源岩甾烷系列呈现出“V”

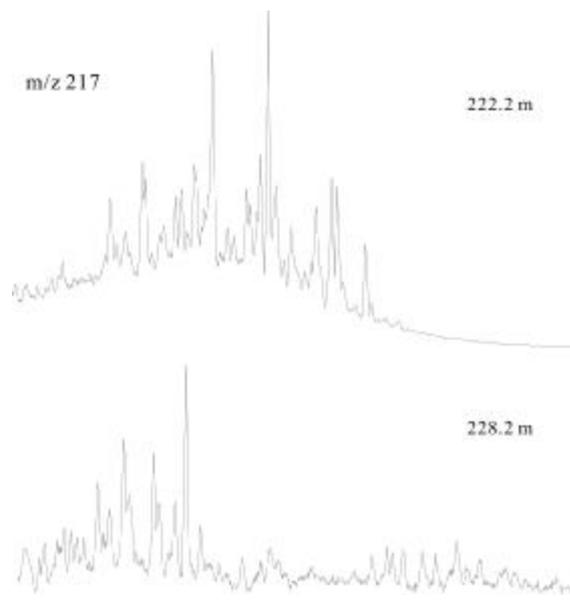


图5 SZK04井北票组油砂样品甾烷质量色谱图  
Fig. 5 Sterane mass chromatogram of the oil sands from Beipiao Formation of SZK04 well

字形分布且  $C_{29}$  甾烷丰度略高于  $C_{27}$  甾烷的特征截然不同。

### 3.4 组分碳同位素

因为有机质碳同位素的主控因素是原始的有机母质来源,那么碳同位素组成特征可以反映其成因类型。已报道的煤系地层中烃源岩及原油碳同位素约为  $-26\text{‰}$ , 而海相沉积环境中生成的烃源岩及原油碳同位素则较轻<sup>[20]</sup>。所分析的两个 SZK04 井油砂样品氯仿沥青“*A*”碳同位素分别为  $-29\text{‰}$ 、 $-31\text{‰}$ ; 饱和烃组分碳同位素分别为  $-29.8\text{‰}$ 、 $-30.6\text{‰}$ ; 芳烃组分碳同位素分别为  $-28.2\text{‰}$ 、 $-30.8\text{‰}$ 。与前人的研究结果对比,发现 SZK04 井油砂组分碳同位素值明显轻于已发表的北票组烃源岩及原油。

## 4 SZK04 井油砂成因类型及来源分析

### 4.1 成因类型分析

通过生物标志化合物及组分碳同位素可以发现,该类油砂十分特殊,因此亟需确定其成因类型,并追溯其可能的烃源岩层,继而挖掘其在该地区油气勘探中的价值和意义。三环萜烷存在于不同沉积环境的烃源岩抽提物及原油中,且稳定性较强,受成熟度和生物降解的影响较小<sup>[21]</sup>。根据  $C_{19}$ — $C_{23}$  三环萜烷相对含量的沉积环境判识图版(图 6A)可以看出, SZK04 井油砂的沼泽生烃母质来源应处于海相/咸水湖相的沉积环境,不同于北票组烃源岩及 SZK02 井油砂的沼泽沉积环境。姥鲨烷植烷比值( $Pr/Ph$ )虽然可能受到多种因素的影响,但依然是指示氧化还原环境的有效参数,且海相原油一般具有硫芴系列高、菲系列低的特点。因此 Hughes<sup>[22]</sup> 以二苯并噻吩/菲( $DBT/P$ )和  $Pr/Ph$  为指标,按沉积环境和岩性划分了图版,用于判断其沉积环境(图 6B)。基于大量实测样品数据的统计,研究区北票组烃源岩及 SZK02 油砂中  $DBT/P$  值均在 0.2 之下,大部分样品都小于 0.1,表明其成岩环境主要是三角洲相等过渡性相带,岩性以煤为主,而 SZK04 油砂  $DBT/P$  值分别为 2.3、2.8。从  $DBT/P$  与  $Pr/Ph$  交汇图可以看出, SZK04 样品测得的数据集中在海相碳酸盐或泥灰岩的相区带中。

芳烃中的三芴系列是判断原油母质原始沉积环境的良好指标。在弱还原和氧化环境中氧芴含量可能较高,在正常还原环境中芴系列较为丰富,在强还原环境

中则以硫芴占优势<sup>[23]</sup>。利用三芴系列相对含量三角图可以区分出海相、盐湖相、咸水湖相、淡水湖相以及沼泽相等差异显著的典型环境(图 6C)。图中可以明显观察到北票组烃源岩及 SZK02 样品都以高氧芴(OF)为特征,而 SZK04 井则以高硫芴(SF)为特征,表明其形成于还原性水体环境中。采用  $SF/(SF+F)$  与  $OF/(OF+F)$  关系图<sup>[24]</sup>也可以较好区分样品的沉积环境(图 6D),北票组烃源岩样品和 SZK02 样品主要集中在煤系地层氧化环境中,而 SZK04 样品则集中在高盐度强还原的环境中,这与三芴系列图得出的结果是一致的。

甾烷与藿烷的比值可以用于指示烃源岩及原油中细菌类和藻类的相对贡献。SZK04 井两个油砂样品中甾藿比较低,分别为 0.19 和 0.20。藿烷被认为是原核生物的生物标志化合物,来自古细菌,而甾烷则是真核生物的生物标志化合物,该特征表明油砂有机质的来源应以细菌输入为主。检测不到常规甾烷可能是由于沉积时期真核生物极少,原核生物大规模发育所致。综上所述, SZK04 井油砂应为海相还原环境沉积的烃源岩贡献,且有机质的来源应以细菌输入为主。

### 4.2 来源分析

SZK04 井油砂具有  $Pr/Ph$  较低,三环萜烷系列中  $C_{23}$  为主峰,  $C_{24}Te/C_{26}TT$  比值低的特征。由于油砂样品中规则甾烷系列基本缺失,且甾/藿极低小于 0.2,反映出其母质来源中细菌类的贡献较大。结合这一特殊的特征,经大量文献比对发现仅在前寒武的岩样中均发现该类特征<sup>[25-27]</sup>。Brocks<sup>[25]</sup> 的研究表明,细菌是新元古代低温时代以前唯一的初级生产者,在此之前的并未检测到  $C_{27}$ — $C_{29}$  规则甾烷或只发现少量的  $C_{27}$  甾烷。在两次冰期间隙,海洋中磷酸盐含量上升及藻类爆发才开始有了甾烷类化合物的记录。无独有偶,在华北中—新元古界烃源岩中也发现了类似的特征<sup>[26]</sup>,在附近的凌源—宁城盆地也发现了中—新元古界的油气显示<sup>[27-28]</sup>。Grantham 等<sup>[29]</sup>认为烃源岩及原油中甾烷碳数分布随地质年代而变化,在前寒武系地层中  $C_{28}$ 、 $C_{29}$  甾烷含量极低,从前寒武纪开始,  $C_{28}/C_{29}$  甾烷比值随时间增加而增加。SZK04 油砂的来源可能来自中—新元古界烃源岩,由于在金羊盆地中—新元古界地层并无露头,无法判断具体来自哪一套烃源岩。因此,在以后的油气勘探中可以关注中—新元古界的烃源岩分布及形成的地质条件,为寻找这类特殊的海相原油提供有用

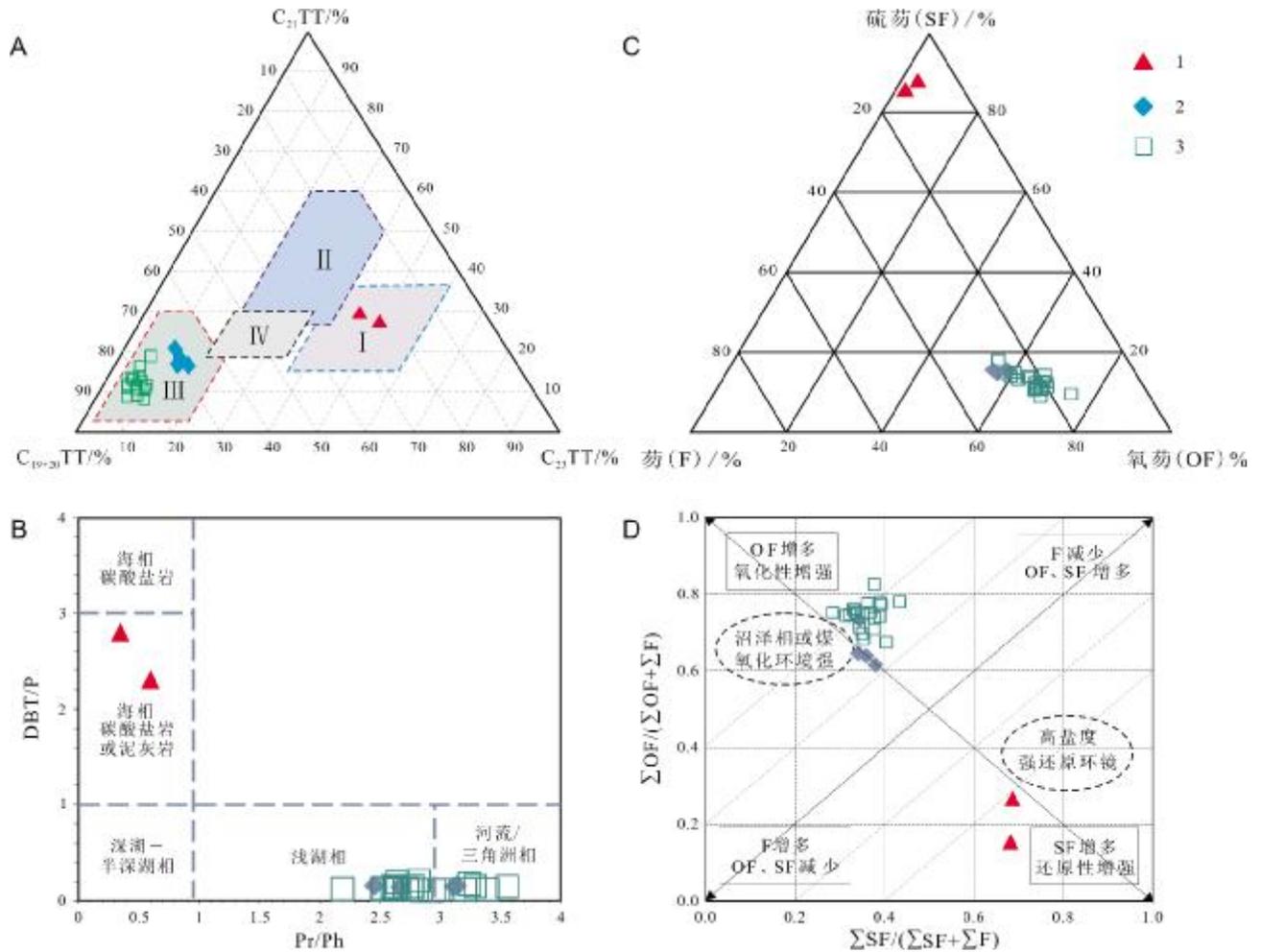


图6 金羊盆地北票组油砂与烃源岩地球化学参数交汇图

(据文献[21-24])

Fig. 6 Geochemical parameter crossplots of the oil sands and source rocks from Beipiao Formation

(From References [21-24])

1—SZK04井油砂(oil sands from SZK04 well); 2—SZK02井油砂(oil sands from SZK02 well); 3—北票组烃源岩(source rock of Beipiao fm.); I—海相/咸水湖相(marine/ saltwater lacustrine facies); II—淡水湖相(freshwater lacustrine facies); III—沼泽相(swamp facies); IV—河流/三角洲相(river/delta facies)

的线索.

5 结论

1) 金羊盆地 SZK04 井在北票组底部砾岩中发现的油砂具有姥植比低、藿烷系列化合物丰富、伽马蜡烷含量较高、甾烷系列化合物缺失且碳同位素较轻的特征,明显不是北票组烃源岩的贡献.

2) 经成因分析认为 SZK04 井油砂应为海相还原环境沉积的烃源岩贡献,且有机质的来源应以细菌输入为主,推测可能来自中—新元古界烃源岩,建议在下

一步的油气勘探关注中—新元古界的烃源岩分布.

参考文献:

[1]陈树旺,丁秋红,郑月娟,等. 松辽盆地外围新区、新层系——油气基础地质调查进展与认识[J]. 地质通报,2013,32(8):1147-1158.  
 [2]张抗. 东北地区油气领域接替形势展望(代序)[J]. 地质通报,2013,32(8):1141-1146.  
 [3]孙求实,张坤,李永飞,等. 辽西金羊盆地北票组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. 地质与资源,2018,27(1):69-76.  
 [4]樊新杰. 金岭寺-羊山盆地石油地质条件分析与评价[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2004.

- [5]张坤. 辽西金羊盆地北部北票组烃源岩地球化学特征及油砂成因研究[D]. 武汉:长江大学, 2016.
- [6]李永飞,陈树旺. 辽西地区金岭寺——羊山盆地油气资源调查新发现[J]. 地质通报, 2014, 33(9):1463-1464.
- [7]张坤,李永飞,唐友军,等. 辽西金羊盆地北票组油砂饱和烃地球化学特征——以 SZK02 井为例[J]. 地质通报, 2015, 34(10):1929-1937.
- [8]李永飞,郜晓勇,孙守亮,等. 辽西金羊盆地北票组泥页岩有机地球化学特征——以 SZK01 钻孔岩心为例[J]. 地质论评, 2015, 61(S1):673-674.
- [9]张涛,李永飞,孙守亮,等. 辽宁金羊盆地羊 D1 井油砂地球化学特征及意义[J]. 地质通报, 2017, 36(4):582-590.
- [10]孙守亮,李永飞,陈树旺,等. 金羊盆地北票组沉积环境及烃源岩有机地球化学特征[J]. 世界地质, 2017, 36(3):889-902.
- [11]黄光辉,王铁冠,钟宁宁,等. 北票盆地侏罗系原油组成特征与油源对比[J]. 江汉石油学院学报, 1993, 15(1):21-27.
- [12]吴桐,李永飞,张涛,等. 辽西地区北票组烃源岩生物标志化合物特征的差异性[J]. 地质与资源, 2018, 27(4):371-376.
- [13]李永飞,冉清昌,刘兵,等. 辽西金羊盆地北部及邻区二维地震成果图集[M]. 北京:地质出版社, 2018:10-12.
- [14]孙鹏,唐友军,张永生,等. 林西县官地剖面林西组烃源岩生物标志化合物特征[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(32):1-6.
- [15]Sun P, Cai C F, Tang Y J, et al. A new approach to investigate effects of biodegradation on pyrrolic compounds by using a modified Manco scale[J]. Fuel, 2020, 265:116937.
- [16]Peters K E, Moldowan J M. The biomarker Guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1993.
- [17]Shanmugam G. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8):1241-1254.
- [18]包建平,王志峰,朱翠山,等. 柴达木盆地东坪地区一类新的原油及其地球化学特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4):829-841.
- [19]Peters K E, Moldowan J M. 生物标记化合物指南[M]. 姜乃煌,译. 北京:石油工业出版社, 1995.
- [20]包建平,孔婕,朱翠山,等. 塔里木盆地一类新海相原油的地球化学特征[J]. 沉积学报, 2012, 30(3):580-587.
- [21]肖洪,李美俊,杨哲,等. 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, 2019, 48(2):161-170.
- [22]Hughes W B, Holba A G, Dzou L I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17):3581-3598.
- [23]孟江辉,张敏,姚明君. 不同沉积环境原油的芳烃组成特征及其地质地球化学意义[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1):228-231.
- [24]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.
- [25]Brocks J J, Jarrett A J M, Sirantoine E, et al. The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals[J]. Nature, 2017, 548(7669):578-582.
- [26]王作栋,梁明亮,郑建京,等. 华北中-上元古界下马岭组烃源岩分子指纹特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3):599-603.
- [27]宗文明,郜晓勇,孙求实,等. 华北北部凌源-宁城盆地薊县系洪水庄组生烃潜力分析——以小庄户剖面为例[J]. 地质与资源, 2017, 26(4):370-376.
- [28]Sun Q S, Xiao F, Gao X Y, et al. A new discovery of Mesoproterozoic erathem oil, and oil-source correlation in the Niuyingzi area of western Liaoning Province, NE China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110:606-620.
- [29]Grantham P J, Wakefield L L. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time[J]. Organic Geochemistry, 1988, 12(1):61-73.