

# 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区 油源对比及高蜡油成因

刁帆<sup>1,2,3</sup>, 王建伟<sup>3</sup>, 陈晓娜<sup>4</sup>, 王政军<sup>3</sup>, 张永超<sup>3</sup>

(1. 东华理工大学 江西省放射性地质学大数据技术工程实验室, 南昌 330013; 2. 东华理工大学 信息工程学院, 南昌 330013;  
3. 中国石油 冀东油田 勘探开发研究院, 河北 唐山 063004;  
4. 中国石化 中原油田 濮城采油厂 地质研究所, 河南 濮阳 457000)

**摘要:**渤海湾盆地黄骅拗陷南堡凹陷高尚堡地区高柳断层两侧原油物性和富集层位差异明显。高柳断层以北, 原油主要富集于沙河街组三段, 普遍具有高蜡特征; 高柳断层以南, 原油主要富集于明化镇组、馆陶组和东营组, 含蜡量相对较低, 为正常原油。应用生物标志物和单体烃碳同位素分析不同层系原油来源。沙三段高蜡油来源不同于高柳断层以南正常原油, 前者主要来自沙河街组三段四亚段( $E_{s3}^4$ ) 烃源岩, 后者主要来自高柳断层以南南林雀次洼东营组三段烃源岩。 $E_{s3}^4$  烃源岩具有高等植物和低等水生生物双重输入的特征, 为深层高蜡原油提供了蜡质来源。微生物对有机质的改造、烃源岩较低的热演化程度和沙三段普遍发育异常高压, 是高蜡油生成、运移和保存的关键因素。

**关键词:**高蜡油; 油源对比; 生物标志物; 单体烃碳同位素; 南堡凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Correlation of oils and source rocks and genesis of high wax oils in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

DIAO Fan<sup>1,2,3</sup>, WANG Jianwei<sup>3</sup>, CHEN Xiaona<sup>4</sup>, WANG Zhengjun<sup>3</sup>, ZHANG Yongchao<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Engineering Laboratory on Radioactive Geoscience and Big Data Technology,  
East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. School of Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China;

4. Pucheng Oil Production Plant, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457532, China)

**Abstract:** There are significant differences between crude oil properties and enrichment horizon across the Gaoliu Fault in the Gaoshangpu area of the Nanpu Sag. Oils are mainly enriched in the third member of Shahejie Formation ( $E_{s3}$ ) to the north of the Gaoliu Fault, and are characterized by a high wax content. However, oils are mainly enriched in the Minghuazhen, Guantao and Dongying formations to the south of the Gaoliu Fault, and are normal crude oils with a low wax content. The biomarkers and compound specific isotopes of crude oils from different layers show that the origin of the high wax content oils in the  $E_{s3}$  is different from that of the oils to the south of the Gaoliu Fault. The former is derived from the source rocks of the  $E_{s3}^4$  and the latter is sourced from the third member of the Dongying Formation ( $E_{d3}$ ) in the Linque Sub-Sag to the south of the Gaoliu Fault. The source rocks of the  $E_{s3}^4$  contain abundant terrigenous higher plants and lower hydrobionts, which provide the wax source. The microbe reformation, low thermal evolution degree and abnormal high pressure in the  $E_{s3}$  are key factors in the formation, migration and preservation of high wax oils.

**Key words:** high wax oils; oil-source correlation; biomarker; compound specific isotope; Nanpu Sag; Bohai Bay Basin

高尚堡地区位于渤海湾盆地黄骅拗陷南堡凹陷北翼, 为一长期发育的背斜构造带, 以北西向和

北东向断层为主(图 1), 是南堡凹陷陆上主力产油区之一。近年来, 高尚堡地区油气勘探持续获得发

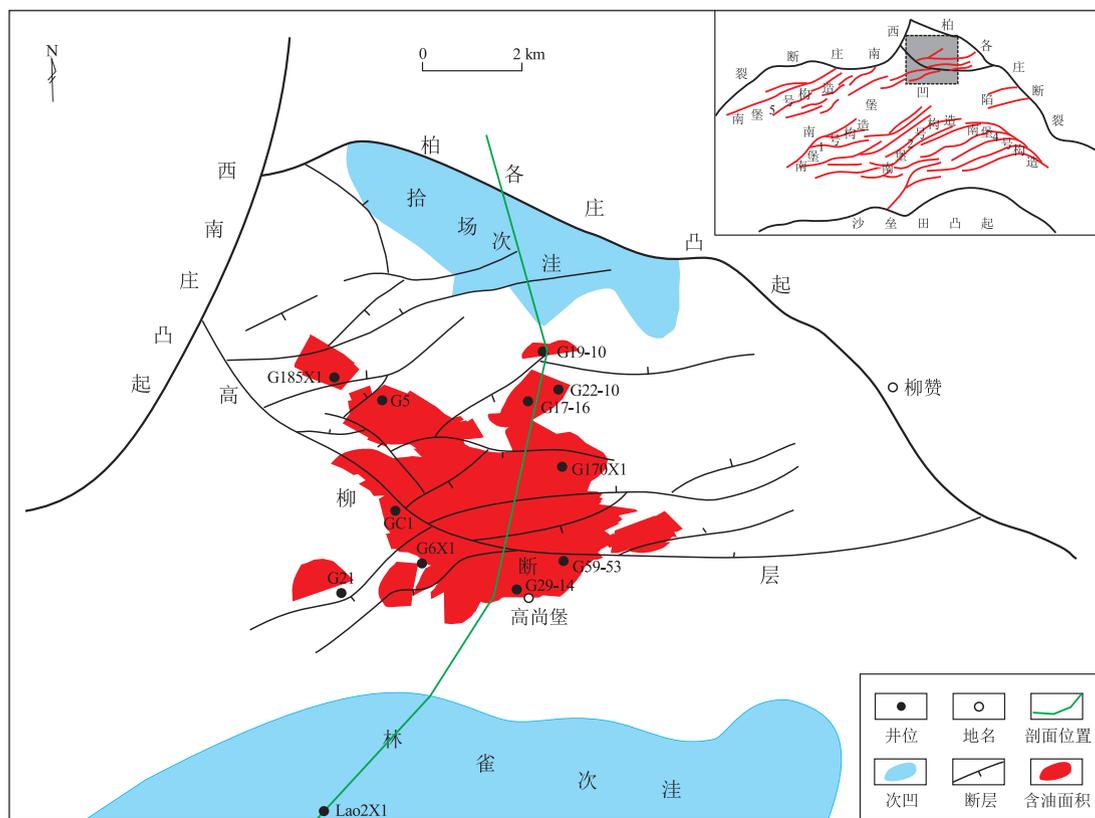


图 1 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区位置

Fig.1 Location of Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

现,尤其是深层石油地质资源量大幅增加,使得该地区油气来源以及深层高蜡油成因备受关注。前人研究主要关注南堡凹陷以林雀次洼为生烃灶的油气成因类型和油气来源<sup>[1-6]</sup>,缺乏对高尚堡油田不同层系油气来源和高蜡油成因的详细研究。笔者通过生物标志化合物、单体烃同位素特征,对高尚堡地区原油来源进行了探讨,并分析了沙三段高蜡油的成因。

### 1 原油物性特征

原油物性是原油化学组成的综合反映,在一定程度上有助于对原油成因进行判断。高尚堡地区原油具有明显的平面和纵向分带性。高柳断层以北,原油主要聚集在深层沙三段,其原油密度和黏度较低,凝固点和含蜡量较高,其蜡质平均含量为

19.7%,最高可达 39.4%,为典型的高蜡油(表 1)。高柳断层以南,原油主要集中分布在馆陶组、明化镇和东营组,其中馆陶组和明化镇组由于埋深较浅,原油均遭受不同程度生物降解,其密度和黏度较高,凝固点和含蜡量较低,含蜡量大多低于 10%(表 1);埋深相对较大的东营组原油未遭受生物降解,其原油物性介于深部沙三段和浅层明化镇组—馆陶组之间。高尚堡地区原油平面和垂向上的规律性分布除了受原油垂向分异作用、运移效应和生物降解的影响之外,更可能是其来源的不同造成了原油特征的差异。

### 2 原油地球化学特征

#### 2.1 链烷烃

高柳断层以南明化镇组—东营组原油碳优势

表 1 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区原油物性特征

Table 1 Physical properties of oils in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

层位	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏度/(mPa·s)	含硫量/%	凝固点/°C	含蜡量/%
Nm	0.833 1~0.985 1/0.932 4(74)	0.014~1 152/282(74)	0.02~0.48/0.17(74)	-26.00~42.00/0.94(74)	0.50~10.20/6.10(74)
Ng	0.826 9~0.984 1/0.910 5(80)	0.003~604/129(80)	0.02~0.84/0.16(80)	-10.00~112.00/8.64(80)	0.10~11.50/6.42(80)
Ed	0.833 2~0.954 5/0.866 3(10)	3.42~491.10/63.09(10)	0.01~0.32/0.12(10)	7.00~34.00/26.52(10)	3.05~15.00/8.51(10)
Es <sub>3</sub>	0.799 0~0.883 8/0.854 1(48)	2.00~96.00/14.34(48)	0.02~0.53/0.15(48)	21.00~41.00/34.61(48)	14.40~39.40/20.38(48)

注:表中分式含义为:最小值~最大值/平均值(样品数)。

指数(CPI)值分布在1.10~1.20之间,为成熟原油; $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 值分布在0.46~1.32之间;Pr/Ph值在0.92~1.66之间,Pr/ $nC_{17}$ 值在0.39~2.11之间,Ph/ $nC_{18}$ 值在0.29~4.23之间。由于埋深较浅,馆陶组和明化镇组原油受到了不同程度的生物降解,其正构烷烃大部分缺失 $C_{15}$ 之前的部分,甚至基本完全缺失(图2a,b)。东营组原油基本为正常原油,正构烷烃系列保存完整(图2c,d),主峰碳多为 $nC_{21}$ ,未见明显的生物降解。

高柳断层以北深层沙三段原油气相色谱谱图主要有两种形态:一种是双峰态前峰型,有 $C_{15}$ 和 $C_{23}$ 两个高峰,低碳数峰略高于高碳数峰(图2e);另一种是双峰态后峰型,有 $C_{15}$ 或 $C_{18}$ 、 $C_{23}$ 两个高峰,高碳数峰略高于低碳数峰(图2f)。这些特征表明低等水生生物和陆生高等植物对生源都有贡献。原油碳优势指数值分布在1.10左右,为正常成熟原油; $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 值分布在0.63~1.44之间;Pr/Ph值在1.05~1.25之间,Pr/ $nC_{17}$ 值在0.29~0.50之间,Ph/ $nC_{18}$ 值在0.21~0.59之间,表明原油主要形成于还原环境中。

## 2.2 甾烷系列化合物

中浅层馆陶组、明化镇和东营组原油主要表现为重排甾烷含量相对较高(图3a-c),重排甾烷/规则甾烷主要分布在0.1~0.3之间(图4a); $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$ 规则甾烷的相对含量分别为37.2%~47.1%,23.2%~28.0%,26.9%~39.7%(图4b),主要呈“V”

字形分布, $C_{27}$ 规则甾烷多表现出略高于 $C_{29}$ 规则甾烷的特征(图3a-c); $C_{30}$ 4-甲基甾烷含量中等,4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷小于0.3(图4c)。

沙三段原油重排甾烷含量明显低于中浅层原油(图3d,e),重排甾烷/规则甾烷基本分布在0.1附近(图4a); $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$ 规则甾烷的相对含量分别为33.5%~35.2%,21.9%~23.5%,42.4%~50.1%,主要呈“V”字形分布,与中浅层原油相比,其 $C_{27}$ 规则甾烷含量略低, $C_{29}$ 规则甾烷含量略高(图4b); $C_{30}$ 4-甲基甾烷含量异常高(图3d), $C_{30}$ 4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷均大于0.3,明显高于中浅层原油(图4c),说明低等水生生物和高等植物对生源都有贡献,与正构烷烃双峰特征一致。

## 2.3 萜烷系列化合物

中浅层馆陶组、明化镇组和东营组原油Ts/Tm分布于1.00~2.29,平均值为1.60,深层沙三段原油Ts/Tm分布于0.86~1.33,平均值为1.18(图4a),说明深层沙三段原油成熟度略低于中浅层原油。这种原油成熟度的“倒置”现象也说明高柳断层两侧的原油具有不同的来源,分属于不同的成藏系统。

高柳断层两侧原油整体来源于淡水环境下形成的烃源岩,伽马蜡烷含量整体较低,伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷分布于0.04~0.12;但深层沙三段原油具有更低的伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷,其分布于0.04~0.06,明显低于中浅层原油(图4c),这种差异也说明油气可能具有不同的来源。

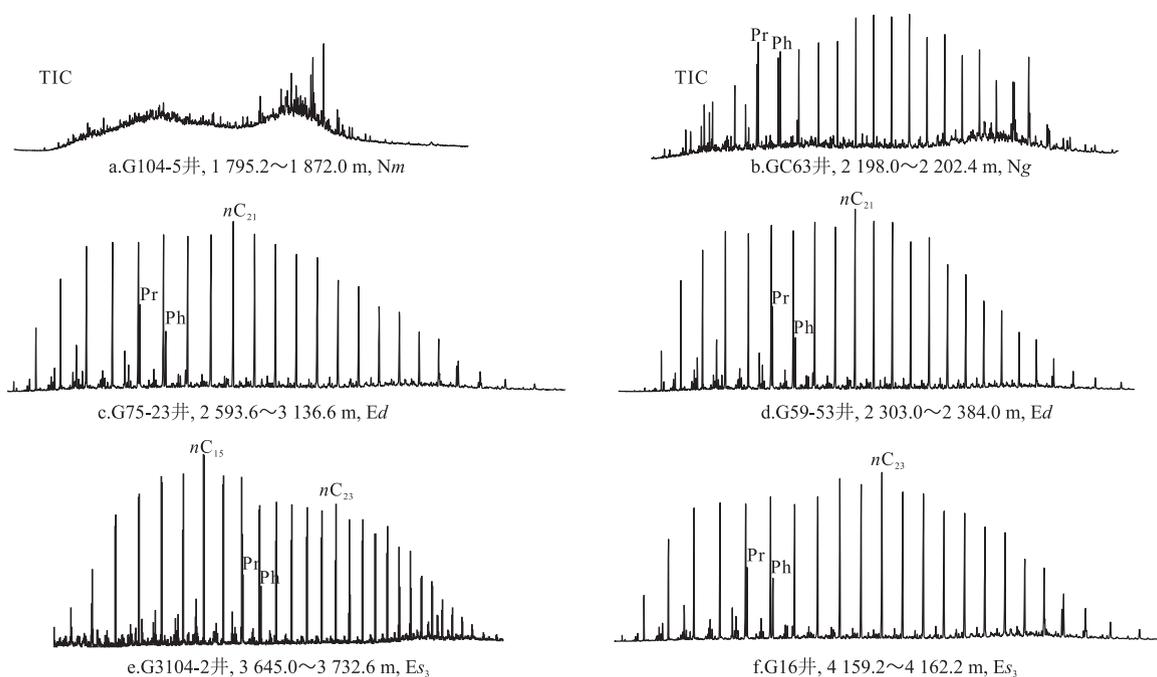


图2 渤海湾盆地南堡凹陷高柳地区原油全油气相色谱

Fig.2 Gas chromatograms of whole oils in Gaoliu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

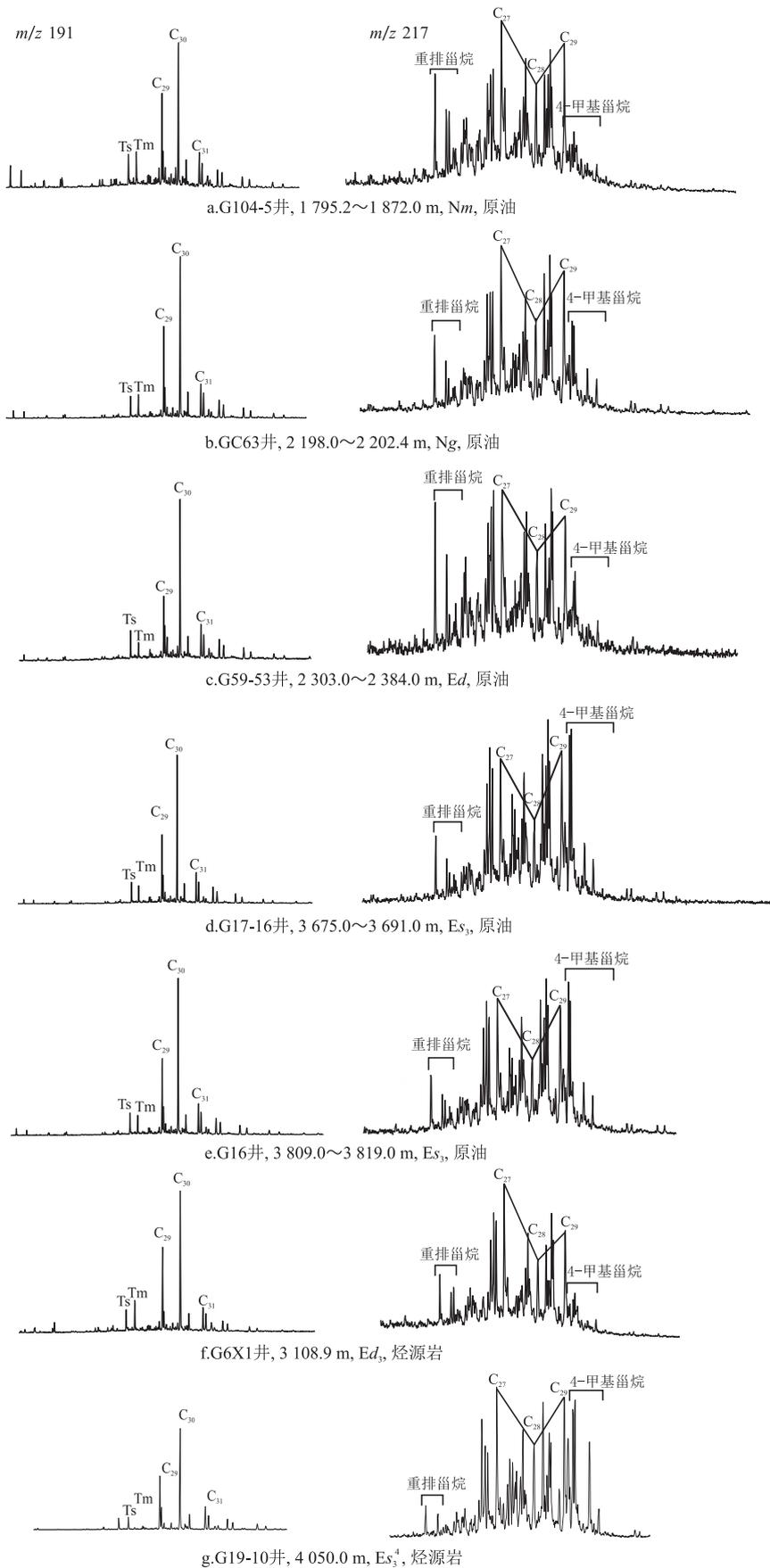


图 3 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区部分原油和烃源岩  $m/z$  191、 $m/z$  217 质量色谱

Fig.3  $m/z$  191 and  $m/z$  217 mass fragmentogram of saturate fractions from oils and source rocks in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

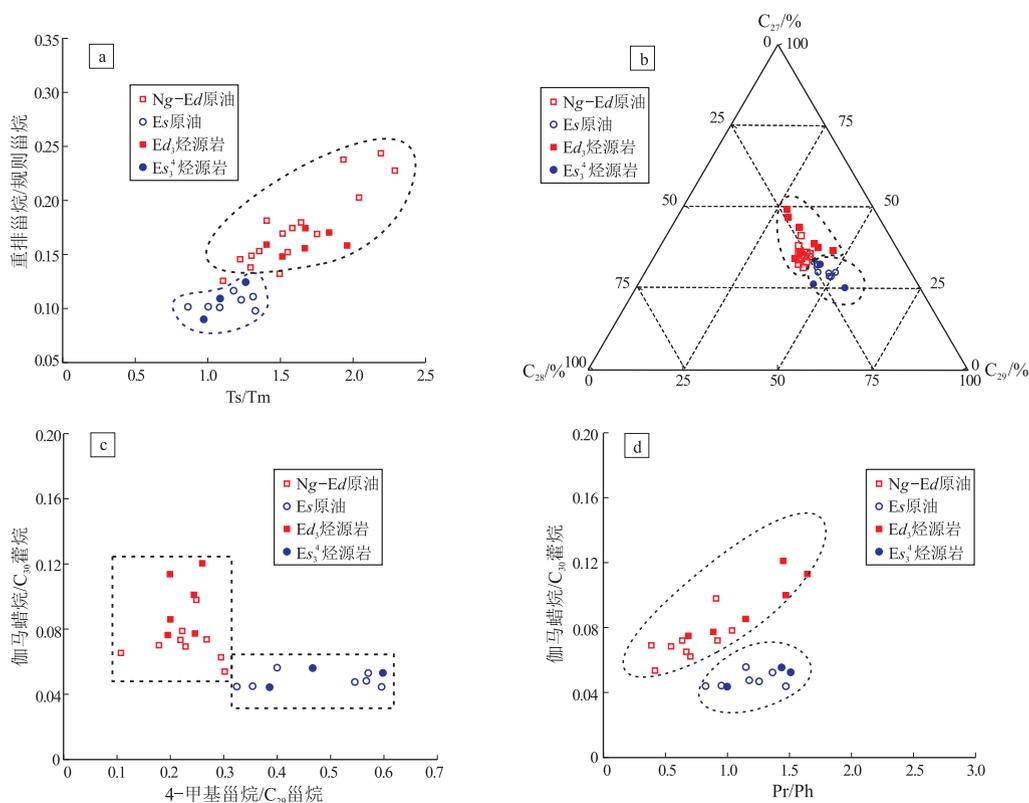


图4 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区油—岩多参数对比

Fig.4 Oil-source rock correlation based on biomarker parameters in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

## 3 油源分析

### 3.1 生物标志物对比

尽管具有相同来源的原油在经过二次运移聚集藏后,原油的化学组成会发生明显的变化,但原油中的部分甾萜烷生物标志物参数是稳定的,受生物降解、成熟度和运移分馏效应影响较小,是油源对比的有效参数<sup>[7-12]</sup>。由于浅层馆陶组和明化镇组原油遭受了一定程度的生物降解,正构烷烃特征被破坏,因此主要选取甾萜烷和类异戊二烯生物标志物进行对比。

高柳断层以南东三段烃源岩甾萜烷地球化学特征主要表现为相对高含量的重排甾萜烷,中等含量的 $C_{30}$  4-甲基甾萜烷(图4f)。重排甾萜烷/规则甾萜烷与 $Ts/Tm$ 线性关系明显(图4a),表现出相对高的成熟度特征。 $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$ 规则甾萜烷近“V”字形分布(图3f), $C_{27}/C_{29}$ 甾萜烷比值较高,主要分布在0.8~1.5之间,说明其有机质来源主要以藻类等低等水生生物为主;规则甾萜烷分布三角图很好地揭示了中浅层原油与其烃源岩间的生源关系(图4b); $C_{30}$  4-甲基甾萜烷/ $C_{29}$ 甾萜烷主要分布在0.19~0.25之间,明显低于 $Es_3^4$ 烃源岩(图4c);伽马蜡烷指数略高于 $Es_3^4$ 烃源岩(图4c), $Pr/Ph$ 分布范围相对较

大,分布于0.7~1.6,表明其形成于相对动荡的还原环境(图4d)。该类烃源岩与明化镇组—东营组原油具有相似的生物标志物特征(图4)。

由于高柳断层上升盘的抬升作用,高柳断层以北沙一段烃源岩基本未成熟,有效烃源岩为形成于主裂陷幕的 $Es_3^4$ 高丰度烃源岩。该烃源岩地球化学最显著的特征表现为 $C_{30}$  4-甲基甾萜烷含量异常高,重排甾萜烷含量明显低于东三段烃源岩(图3g)。 $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$ 规则甾萜烷近“V”字形分布(图3g),其特征与沙三段原油规则甾萜烷分布特征较为接近(图4b), $C_{27}/C_{29}$ 甾萜烷比值低于高柳断层以南东三段烃源岩,主要分布在0.5~0.9之间,说明其陆源高等植物输入相对较多。 $C_{30}$  4-甲基甾萜烷/ $C_{29}$ 甾萜烷主要分布在0.31~0.59之间,明显高于东三段烃源岩(图4c);伽马蜡烷含量极低,伽马蜡烷指数低于东三段烃源岩; $Pr/Ph$ 分布范围相对集中,分布于1.0~1.5,表明其形成于相对稳定的还原环境(图4d)。以上烃源岩生物标志物特征明显有别于东三段烃源岩,与沙三段原油生物标志物特征相似(图4)。

### 3.2 单体烃碳同位素

原油中的单体烃碳同位素较之全油和族组分碳同位素能从分子级别反映单个化合物的来源,现已广泛应用于精细油气源对比<sup>[13-14]</sup>。高尚堡地区

深层沙三段原油正构烷烃单体烃碳同位素近似表现为一斜线,且随着碳数增加,同位素值有逐渐降低的趋势,尤其是  $nC_{17}$  之后的碳同位素值普遍低于  $-29‰$ ,该特征与 G19-10 井烃源岩单体烃碳同位素一致,两者应具有油源对应关系(图 5)。与深层高蜡原油相比,中浅层馆陶组—东营组原油单体烃碳同位素偏重,碳同位素值普遍大于  $-29‰$ ,与高 21 井东三段烃源岩特征较为类似,两者具有亲缘关系(图 5)。

综上所述,原油来源的不同是影响两类原油存在差异性的根本原因。沙三段原油主要分布在高柳断层北侧的下盘,断裂系统起到沟通源岩和储集层的作用,原油主要来自深部  $Es_3^4$  烃源岩;明化镇组—东营组原油临近东三段源岩,侧向供烃,垂向疏导(图 6),原油可能主要来自东三段烃源岩。

### 4 高蜡油成因

中国陆相原油大多具有含蜡量高的特点,诸如

大民屯凹陷、东营凹陷、南阳凹陷和泌阳凹陷均发现了高蜡、特高蜡原油,蜡质含量最高可达 67%<sup>[15-19]</sup>。前人研究表明,高蜡油中的蜡质既可以源自高等植物蜡质或角质、孢粉质等,也可以来自藻类和低等水生生物中的藻质素<sup>[19]</sup>。此外,烃源岩热演化程度、微生物改造、气洗作用等外部成藏环境,也是影响高蜡油生成保存的重要因素<sup>[20-24]</sup>。

研究表明,细菌、蓝绿藻、盘星藻和丛粒藻等各种淡水微藻类细胞外壁的藻胶鞘等,都是原油中蜡的重要来源<sup>[19,22-23]</sup>。前已述及,高尚堡地区高蜡油来源于  $Es_3^4$  烃源岩,其生物标志物表现出明显的  $C_{30-4}$ -甲基甾烷优势,显微镜下可见层状藻质体(图 7a)和亮黄色藻质体碎片(图 7b),说明拾场次注当时湖泊生产力水平较高,渤海藻、副渤海藻等藻类繁盛。此外, $Es_3^4$  烃源岩  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  和  $C_{29}$  规则甾烷呈“V”字形分布,说明其还有丰富陆源高等植物碎屑输入。因此,烃源岩中大量藻类细胞壁和高等植物的角质体和孢子体为原油中的蜡质提供了来源,

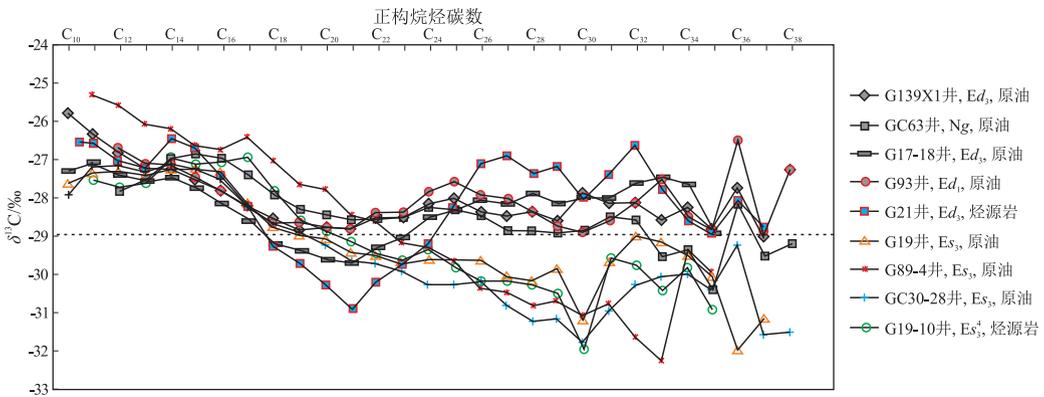


图 5 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区不同类型原油单体烃碳同位素曲线分布

Fig.5 Distribution of compound specific carbon isotopes of *n*-alkanes for oils in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

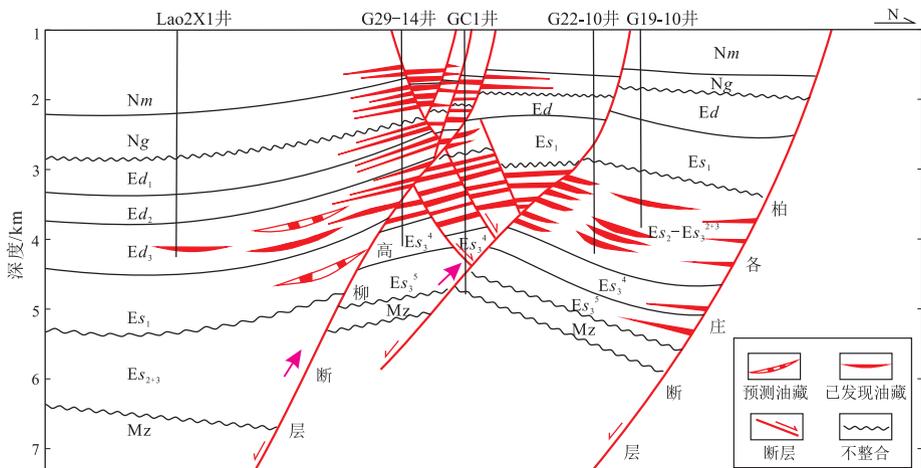


图 6 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区油气分布剖面位置见图 1。

Fig.6 Reservoir distribution in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

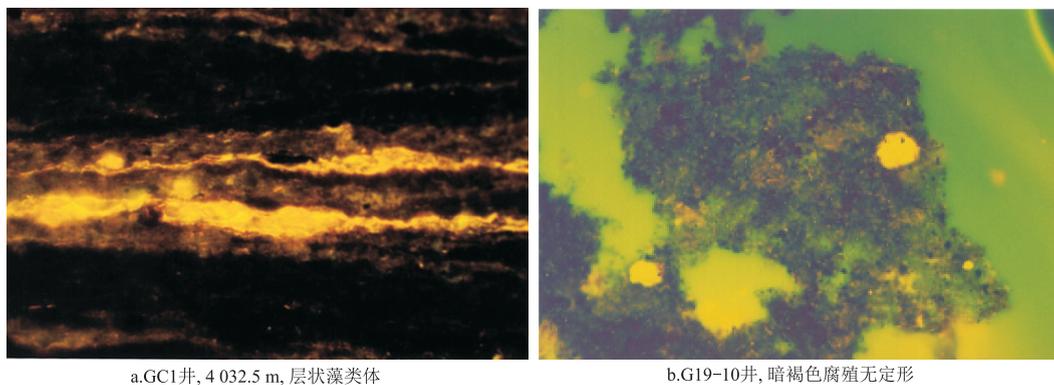


图7 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区 Es<sub>3</sub> 段烃源岩有机显微组分特征

Fig.7 Organic maceral characteristics of Es<sub>3</sub> source rocks in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

是高蜡油生成的物质基础。

有机质的微生物改造是形成高蜡油的重要因素之一,该过程使有机质中类脂化合物富集,有利于高蜡油的生成。甾烷和藿烷的生物前驱物分别为真核生物(藻类和高等植物)和细菌,其比值可以反映不同有机质来源对烃源岩的贡献。与中浅层原油相比,深部沙三段高蜡油和烃源岩均具有相对低的甾烷/藿烷(0.10~0.15),低于东三段烃源岩甾烷/藿烷(0.12~0.28),表明其遭受了明显的微生物改造过程。此外,与大民屯凹陷<sup>[23]</sup>和东营凹陷<sup>[16]</sup>发现的高蜡油特征类似,高尚堡地区高蜡油中含有丰富的8β(H)-补身烷、8β(H)-升补身烷以及重排系列,尤为明显的是高蜡油中含有丰富的C<sub>15</sub>-二环倍半萜烷(图8),说明微生物活动对高蜡油形成起到了重要作用。

对现代植物角质蜡的热模拟实验表明,高蜡油

主要形成于低演化阶段的烃源岩<sup>[25-26]</sup>。高尚堡地区烃源岩镜质体反射率和沉降史研究表明,该地区烃源岩长期处于低演化阶段,其R<sub>0</sub>基本在0.8%以下(图9)。与正常原油相比,深层沙三段高蜡油C<sub>29</sub>甾烷αββ/(ααα+αββ)主要分布在0.39~0.45之间,C<sub>29</sub>甾烷ααα20S/(S+R)主要分布在0.36~0.42之间,原油成熟度处于低成熟与成熟分界附近,原油成熟度不高。其次,深层高蜡油重排甾烷/规则甾烷与Ts/Tm比值略低于馆陶组-东营组原油(图3c,d),说明其演化阶段略低于高柳断层以南原油。较低的热演化程度利于高蜡油形成高碳数的烃类,蜡质含量增加。

异常高压对高蜡油的生成、聚集和保存起着重要作用,较高的压力可以大大提高烃类物质的稳定性,利于高碳数烃类的保存<sup>[27]</sup>。高尚堡地区深层沙河街组埋深大于3 200 m的地层明显存在一个

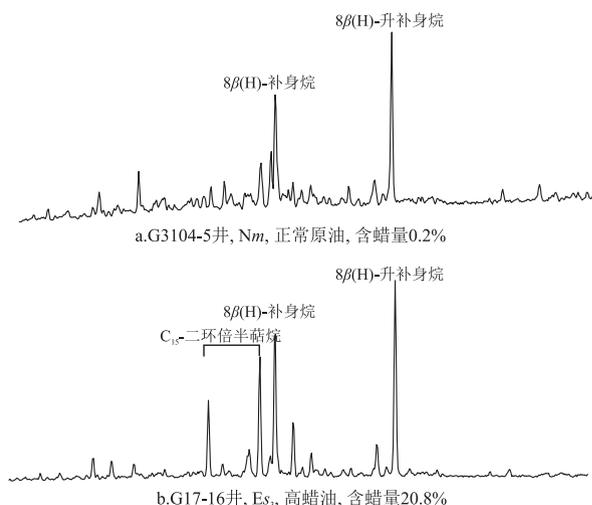


图8 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区高蜡油与正常原油中补身烷特征

Fig.8 Distribution patterns of sesquiterpanes of high wax content crude oils and normal crude oils in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

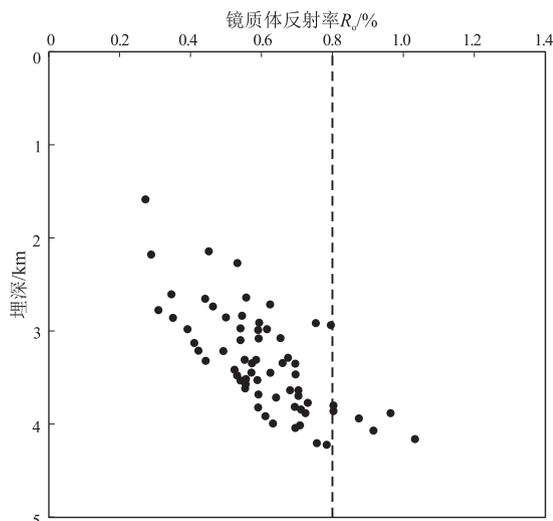


图9 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区烃源岩镜质体反射率与深度关系

Fig.9 Relationship between R<sub>0</sub> and depth of source rocks in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

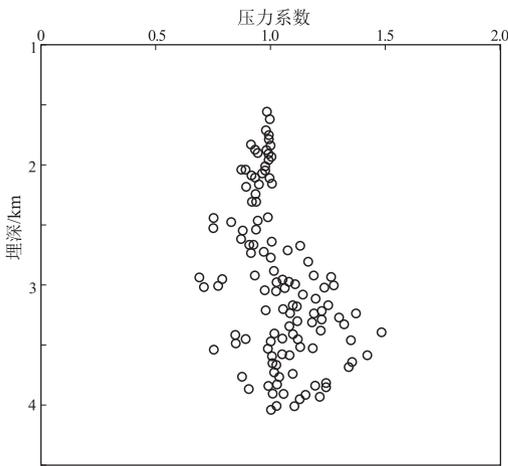


图 10 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡地区  
压力系数与深度关系

Fig.10 Relationship between pressure coefficient and depth in Gaoshangpu area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

异常高压带,压力系数最高可达 1.5(图 10)。异常高压有利于烃源岩生成链烷烃,并且不易断裂。此外,高分子量烃的排出需要极大的动力条件,超压引起的地层破裂和裂隙能够瞬间提高泥岩的渗透率,可以有效提升高分子量烃类的排出效率,使高蜡油快速排出,聚集成藏。

综上所述,高尚堡地区烃源岩中丰富的陆源碎屑和藻类为高蜡油形成提供了物质基础,微生物的改造对高蜡油的形成作用重大,烃源岩较低的热演化阶段和异常高压适宜于长链烷烃的生成与保存,同时异常高压还为高蜡油提供了油气运移的动力。

## 5 结论

(1) 高尚堡地区原油受高柳断层的影响,其两侧原油性质、来源和聚集特征存在明显差异。高柳断层以南,原油主要富集于东营组、明化镇组和馆陶组,原油主要为正常原油,含蜡量较低,生标特征主要表现为相对高含量的重排甾烷、中等含量的  $C_{30}4$ -甲基甾烷以及较低含量的伽马蜡烷,原油成熟度略高,主要来源于高柳断层以南林雀次注东三段烃源岩;高柳断层以北,原油主要富集于沙三段,原油含蜡量较高,生物标志化合物特征主要表现为异常高含量的  $C_{30}4$ -甲基甾烷、中等含量的重排甾烷以及极低含量的伽马蜡烷,原油主要来源于拾场次注  $Es_3^4$  烃源岩。

(2) 与正常原油相比,深层沙三段高蜡油的形成具有独特的地质地球化学条件,烃源岩中丰富的陆源碎屑和藻类为高蜡油形成提供了物质基础;微生物的改造更有利于高蜡油的形成,烃源岩长期处

于较低的热演化阶段和异常高压适宜于长链烷烃的生成与保存,是高蜡油运聚成藏的关键因素。

## 参考文献:

- [1] 李素梅,董月霞,王政军,等.南堡凹陷潜山原油特征与成因探讨[J].沉积学报,2014,32(2):376-384.  
LI Sumei, DONG Yuexia, WANG Zhengjun, et al. Characteristics and formation mechanism of deep oils from Nanpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 376-384.
- [2] 万中华,李素梅.渤海湾盆地南堡油田原油特征与油源分析[J].现代地质,2011,25(3):599-607.  
WAN Zhonghua, LI Sumei. Characteristics and oil-source investigation of the oils in the Nanpu Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2011, 25(3): 599-607.
- [3] 李素梅,庞雄奇,万中华.南堡凹陷混源油分布与主力烃源岩识别[J].地球科学(中国地质大学学报),2011,36(6):1064-1072.  
LI Sumei, PANG Xiongqi, WAN Zhonghua. Mixed oil distribution and source rock discrimination of the Napu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(6): 1064-1072.
- [4] 梅玲,张枝焕,范有余,等.南堡凹陷  $Es_3^4$  段烃源岩有机地球化学特征及其油源贡献[J].天然气地球科学,2009,20(6):961-967.  
MEI Ling, ZHANG Zhihuan, FAN Youyu, et al. Geochemical characteristics of  $Es_3^4$  source rocks and its oil-source contribution in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 961-967.
- [5] 梅玲,张枝焕,王旭东,等.渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(6):40-46.  
MEI Ling, ZHANG Zhihuan, WANG Xudong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(6): 40-46.
- [6] 李素梅,姜振学,董月霞,等.渤海湾盆地南堡凹陷原油成因类型及其分布规律[J].现代地质,2008,22(5):817-823.  
LI Sumei, JIANG Zhenxue, DONG Yuexia, et al. Genetic type and distribution of the oils in the Nanpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2008, 22(5): 817-823.
- [7] 李继东,徐田武,唐友军,等.东濮凹陷马厂地区原油地球化学特征与油源对比[J].断块油气田,2019,26(4):426-428,479.  
LI Jidong, XU Tianwu, TANG Youjun, et al. Geochemical characteristics and source correlation of crude oil in Machang area, Dongpu Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 426-428, 479.
- [8] 王萍,向连格,姜海健,等.银根—额济纳旗盆地拐子湖凹陷白垩系油源对比分析[J].石油实验地质,2019,41(3):427-434.  
WANG Ping, XIANG Liange, JIANG Haijian, et al. Cretaceous oil-source correlation in Guaizihu Sag, Yin'gen-E'ji'naqi Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 427-434.
- [9] 陈治军,马芳侠,肖刚,等.银额盆地哈日凹陷巴音戈壁组精

- 细油源对比[J].石油与天然气地质,2019,40(4):900-916.
- CHEN Zhijun, MA Fangxia, XIAO Gang, et al. oil-sources rock correlation of Bayingebi Formation in Hari Sag, Yin'gen-E'ji'naqi Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4):900-916.
- [10] 田德瑞, 吴奎, 张如才, 等.渤海湾盆地辽西凸起北段锦州20油田原油地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质, 2018, 40(3):410-417.
- TIAN Denui, WU Kui, ZHANG Rucui, et al. Geochemical features and oil-source correlation of crude oils from JZ20 oil field on the northern margin of Liaoxi Uplift, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3):410-417.
- [11] 齐玉民, 郝鹏, 王渝, 等.渤中凹陷西次洼陡坡带精细油源对比[J].断块油气田, 2018, 25(2):151-156.
- QI Yumin, HAO Peng, WANG Yu, et al. oil-source rock correlation of steep slope of western subsag of Bozhong Sag[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(2):151-156.
- [12] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide, biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005:483-607
- [13] 王丽, 曹新星, 李艳, 等.松辽盆地湖相烃源岩中生物标志物的单体烃碳同位素组成特征及其意义[J].地球化学, 2015, 44(4):337-347.
- WANG Li, CAO Xinxing, LI Yan, et al. The carbon isotopic composition of individual biomarkers in lacustrine source rocks from Songliao Basin and its biogeochemical implication [J]. Geochimica, 2015, 44(4):337-347.
- [14] 李素梅, 郭栋.东营凹陷原油单体烃碳同位素特征及其在油源识别中的应用[J].现代地质, 2010, 24(2):252-258.
- LI Sumei, GUO Dong. Characteristics and application of compound specific isotope in oil-source identification for oils in Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(2):252-258.
- [15] 刘会平.东营凹陷南斜坡丁家屋子高蜡油油源分析[J].矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(4):505-508.
- LIU Huiping. Oil source correlation of high waxy oil in Dingjiawuzi area in southern slope zone, Dongying Sag[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(4):505-508.
- [16] 吕慧, 陈致林, 王忠, 等.济阳拗陷东营凹陷南斜坡高蜡原油高分子量烃类分布及高蜡成因[J].石油与天然气地质, 2008, 29(3):355-360.
- LÜ Hui, CHEN Zhilin, WANG Zhong, et al. Distribution of high molecular weight hydrocarbons and genesis of high wax content oil from the south slope zone of the Dongying Sag, the Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3):355-360.
- [17] 谢文彦, 姜建群, 张占文, 等.大民屯凹陷高蜡油成因及分布规律[J].石油学报, 2007, 28(2):57-61.
- XIE Wenyan, JIANG Jianqun, ZHANG Zhanwen, et al. Origin and distribution of high-waxy oil in Damintun Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2):57-61.
- [18] 李水福, 张冬梅.南阳凹陷高蜡的原油成因[J].新疆石油地质, 2007, 28(1):116-118.
- LI Shuifu, ZHANG Dongmei. Genesis of high-wax oil in Nanyang Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1):116-118.
- [19] 王飞宇, 郝石生, 何萍, 等.泌阳凹陷湖相藻类体中藻质素作为高蜡油母质[J].科学通报, 1997, 42(11):1193-1197.
- WANG Feiyu, HAO Shisheng, HE Ping, et al. Algaenans in alginate is the parent materials of waxy oil in Biyang Sag [J]. Chinese Science Bulletin 1997, 42(11):1193-1197.
- [20] 黄第藩, 赵孟军, 张水昌.塔里木盆地满加尔油气系统下古生界油源油中蜡质烃来源的成因分析[J].沉积学报, 1997, 15(2):6-13.
- HUANG Difan, ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang. Genetic analysis of the origin of the Lower Paleozoic waxy hydrocarbon from the Manjiar oil-gas system, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2):6-13.
- [21] 张水昌. 运移分馏作用:凝析油和蜡质油形成的一种重要机制[J].科学通报, 2000, 45(6):667-670.
- ZHANG Shuichang. The migration fractionation: an important mechanism in the formation of condensate and waxy oil [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(6):667-670.
- [22] 黄海平, 郑亚斌, 张占文, 等.低等水生生物:高蜡油形成的重要来源[J].科学通报, 2003, 48(10):1092-1098.
- HUANG Haiping, ZHENG Yabin, ZHANG Zhanwen, et al. Lacustrine biomass: a significant precursor of high wax oil [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(10):1092-1098.
- [23] 黄海平, 李虹, 马刊创, 等.大民屯凹陷高蜡油的形成条件[J].石油与天然气地质, 2001, 22(1):64-67.
- HUANG Haiping, LI Hong, MA Kanchuang, et al. Formation condition of high wax oils in Damintun Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1):64-67.
- [24] 苏洲, 张慧芳, 韩剑发, 等.塔里木盆地库车坳陷中、新生界高蜡凝析油和轻质油形成及其控制因素[J].石油与天然气地质, 2018, 39(6):1255-1269.
- SU Zhou, ZHANG Huifang, HAN Jianfa, et al. Origin and controlling factors of Mesozoic-Cenozoic gas condensates with high wax content and high gravity oil in Kuqa Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6):1255-1269.
- [25] TEGELAAR E W, MATTHEZING R M, JANSEN J B H, et al. Possible origin of *n*-alkanes in high-wax crude oils [J]. Nature, 1989, 342(6249):529-531.
- [26] 郭瑞, 郭涛, 王晨杰, 等.渤中西洼馆陶组稠油特征及差异稠化主控因素[J].断块油气田, 2019, 26(4):429-434.
- GUO Rui, GUO Tao, WANG Chenjie, et al. Characteristics of heavy oil and main controlling factors of oil densification of Guantao Formation in western Bozhong Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4):429-434.
- [27] 肖万生.地球内部成烃新机制探索:含碳物质与水反应的实验研究[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2001:12-31.
- XIAO Wansheng. Hydrocarbon formation mechanism in the Earth's interior: experimental study on reactions of carbon-containing materials with water [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2001:12-31.