

# 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷沙河街组 原油地球化学特征及油源对比

刘 飞<sup>1</sup>, 朱钢添<sup>1</sup>, 何 生<sup>1</sup>, 王永诗<sup>2</sup>, 刘 庆<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东 东营 257015)

**摘要:**惠民凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷中的一个富油气单元。系统研究惠民凹陷临南洼陷 20 个原油样品和 4 个烃源岩样品地球化学特征, 分析其成熟度、沉积环境和有机质来源, 利用烃源岩和原油生物标志化合物参数建立油-岩关系, 筛选有效参数运用交会图和聚类统计划分原油类型和进行油源对比。研究区原油已进入成熟阶段, 生油母质的沉积环境为弱氧化-弱还原的湖沼相-淡水湖相, 具有陆相湖盆混合型母质特征。总体上, 研究区原油有较高的饱和烃含量和较低的胶质及沥青质含量, 正构烷烃为“平台式”双峰形态分布, 伽马蜡烷含量较低, 4-甲基甾烷含量较高。研究区内不同地区原油的地球化学特征存在一定差别, 可按地区分为南带和北带。相比南带的原油, 北带原油样品中 4-甲基甾烷/ $C_{29}R$ 、 $Ts/Tm$  比值较低, 而  $C_{29}$  降藿烷/ $C_{29}$  降新藿烷、1,2,7-1,2,6-三甲萘、菲/ $\Sigma$ 甲基菲较高。研究区沙四段烃源岩有机质类型为 III 型, 有机质丰度较低; 沙三段烃源岩有机质以 II 型为主, 有机质丰度较高, 其中, 沙三下亚段和中亚段是临南洼陷的主力烃源岩。通过系统对比研究区原油和烃源岩的地球化学特征, 认为临南洼陷沙三、沙四段原油来自沙三下、中亚段烃源岩。

**关键词:**生物标志化合物; 油源对比; 聚类分析; 沙河街组; 临南洼陷; 惠民凹陷; 济阳拗陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation of Shahejie Formation in Linnan Sub-Sag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin

LIU Fei<sup>1</sup>, ZHU Gangtian<sup>1</sup>, HE Sheng<sup>1</sup>, WANG Yongshi<sup>2</sup>, LIU Qing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China)

**Abstract:** The Huimin Sag is a significant petroleum unit in the Jiyang Depression. This work reports a systematic study of the geochemical characteristics of 20 crude oil samples and 4 source rock samples collected from the Linnan Sub-Sag of the Huimin Sag and interpretations of maturity, sedimentary environment and organic matter sources. Oil-source rock relationship was established by using the biomarker parameters of the source rock and crude oil samples. To classify the oils and to interpret the oil-source correlation, various effective parameters were selected and processed using cross-plots and cluster analysis. The results showed that the crude oils have entered the mature stage, with continental-lacustrine-basin hybrid parent materials and a weakly oxidizing to weakly reducing depositional environment. Most of the crude oils had a high content of saturated hydrocarbon, low contents of resins and asphaltene, “platform” bimodal chromatograms of *n*-alkanes, low content of gammacerane and high content of 4-methyl steranes. According to the differences of the geochemical characteristics of certain areas, crude oils were divided into the south zone oils and the north zone oils. Compared with the south zone oils, the north zone oils possessed lower ratios of 4-methyldecane/ $C_{29}R$  and  $Ts/Tm$ , and higher ratios of  $C_{29}$  norhopane/ $C_{29} Ts$ , 1,2,7-1,2,6-trimethylnaphthalene and phenanthrene/ $\Sigma$  methyl phenanthrenes. The organic matter type of the source rocks of the fourth member of Shahejie Formation in the Linnan Sub-Sag is type III, and the abundance of organic matter is low. The organic matter of the source rocks of the third member of Shahejie Formation is dominated by type II, and the abundance of organic matter is high. The lower and middle sections of the third member of Shahejie Formation are the main source rocks of

收稿日期: 2019-07-23; 修订日期: 2019-09-09。

作者简介: 刘飞(1993—), 男, 硕士研究生, 从事油气地球化学研究。E-mail: liufei2017@cug.edu.cn。

通信作者: 朱钢添(1988—), 男, 博士, 副教授, 从事油气地球化学研究。E-mail: zhugangtian@163.com。

基金项目: 国家“十三五”科技重大专项子课题(2016ZX05006003-001, 2017ZX05005-001-008)资助。

the sub-sag. By systematically comparing the geochemical characteristics of the crude oils and the source rocks, it was found that the crude oils from the third and fourth members of Shahejie Formation of the Linnan Sub-Sag came from the source rocks of the lower and middle sections of the third member of Shahejie Formation.

**Key words:** biomarkers; oil-source correlation; cluster analysis; Shahejie Formation; Linnan Sub-Sag; Huimin Sag; Jiyang Depression; Bohai Bay Basin

惠民凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷西部,其临南洼陷是一个主要的生油洼陷;该凹陷已发现临南、曲堤、江家店 3 个油田,探明石油地质储量约  $0.7 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。前人对惠民凹陷的研究主要结合构造特征、沉积成岩特征、地层压力、油气充注史等探讨油气成藏规律<sup>[2-7]</sup>,或者对原油物性及特定层位烃源岩开展研究<sup>[8-9]</sup>。已有研究认为:惠民凹陷古近系发育沙四段和沙三段优质烃源岩,生油条件较好;在古近系孔店组—新近系明化镇组中发现了 8 套含油层系,尤其是在古近系中发育冲积扇、水下扇、三角洲、河流等多种沉积相的砂体,储层类型多;发育 3 套区域盖层,分别为沙三下亚段、沙三中亚段和沙一段—东营组;油藏类型有构造、岩性和复合油气藏等;油气成藏受断层、沉积相带、火山活动等多重因素影响<sup>[2-4,10]</sup>;受有利生油洼陷的限制,油气主要分布在临南洼陷及周缘,而北部的阳信洼陷和滋镇洼陷仅有少量油气分布<sup>[1,5]</sup>。已有公开发表的成果中针对临南洼陷原油和烃源岩地化特征的系统研究较少,油源关系还需进一步梳理。由于沙四段和沙三段烃源岩形成时沉积环境变化大,有机母质来源多样,给油源分析带来多解性。本文应用多种生标地化参数交会图和多元统计中的聚类分析<sup>[11-13]</sup>来研究临南洼陷原油和烃源岩的有机地化特征,划分原油成因类型,深化油—油和油—岩对比研究,明确油—源关系,以期为研究区的油气勘探提供依据。

## 1 区域地质概况

惠民凹陷面积约  $7\ 000 \text{ km}^2$ ,根据构造特征和地层发育情况,可划分为临南、滋镇、阳信、里则镇等 4 个次级洼陷和中央隆起带、南部斜坡带、曲堤地垒等次级构造单元(图 1)<sup>[5]</sup>。临南洼陷为主力生烃洼陷,该洼陷及其周缘为油气分布的主要地区,其基底为太古界变质岩,缺失元古界;新生代沉积岩层自下而上依次为古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)以及第四系平原组(Qp)<sup>[2]</sup>。本文研究层段为沙河街组沙四段(Es<sup>4</sup>)和沙三段(Es<sup>3</sup>)。沙四段分为下亚段和上亚段;下亚段岩性主要为紫

红色泥岩和粉砂岩互层;上亚段岩性主要为灰色与灰褐色砂泥岩互层夹碳质页岩。沙三段分为下亚段、中亚段和上亚段;下亚段岩性主要为灰色细砂岩和泥岩,夹薄层碳质页岩;中亚段岩性主要是灰色泥岩和褐色油页岩,局部夹砂岩和火成岩;上亚段岩性主要为灰色泥岩与灰白色粉砂岩互层,局部发育碳质页岩夹薄煤层<sup>[14]</sup>。

## 2 样品与实验方法

### 2.1 样品概况

原油样品采自临南洼陷 17 口钻井,共 20 个样品(图 1),涉及的层位有沙四段和沙三段。采自沙四段油层的油样有 4 个,分别采自夏 46、夏 66、夏 509-S4 和夏 510 等 4 口钻井,其余油样均采自沙三段油层。烃源岩样品取自研究区古近系主要烃源岩层系,共 4 块样品,分别在沙四上亚段、沙三下、中、上亚段各取 1 块,烃源岩取样井位见图 1。

### 2.2 实验方法

烃源岩可溶有机质提取采用索氏抽提法完成,氯仿沥青“A”和原油族组成分离按行业标准<sup>[15]</sup>进行,先用正己烷过滤除去沥青质,然后采用柱层析法分离饱和烃、芳烃、胶质等族组分。饱和烃和芳烃的气相色谱(GC)和气相色谱—质谱(GC-MS)分析仪器分别为美国 Agilent 公司的 7890A 气相色谱仪和 7890A 气相色谱仪联用 5975C 质谱仪;样品的 GC 和 GC-MS 分析方法和流程均按行业标准<sup>[16]</sup>完成。聚类分析使用 IBM SPSS Statistics V22.0.0 完成。

## 3 原油地化特征

### 3.1 原油族组分

原油样品经过族组分分离后得到各组分含量,其中饱和烃含量为 42%~72%,芳香烃含量为 12%~20%,胶质含量为 1%~14%,沥青质含量为 1%~14%,饱芳比为 2.35~5.18,总烃含量为 69%~90%。原油的族组成与母质成因、成熟度具有相关性<sup>[17-20]</sup>,由临南洼陷原油族组成特征分析认为,该地区原油具有相似的母质来源,成熟度较高,具有高饱芳比和高总烃含量以及胶质+沥青质含量较低

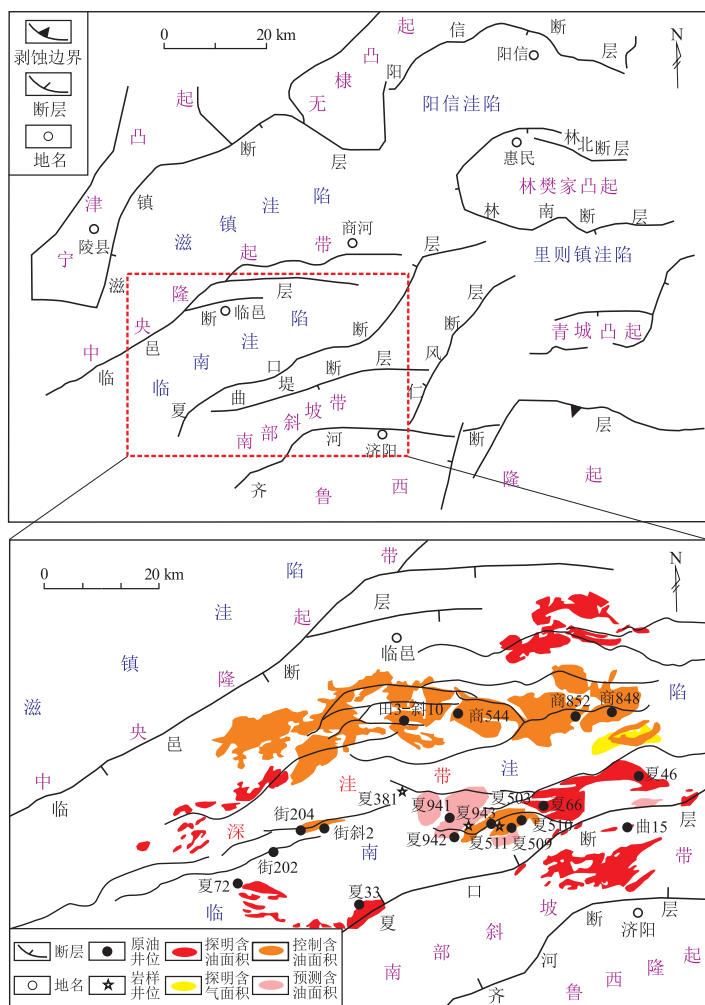


图1 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷区域位置及构造单元

Fig.1 Regional location and tectonic units of Linnan Sub-Sag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin

的特征;但其中曲15、商544、商848、商852、田3-斜10等井的原油样品,其胶质+沥青质含量相对较高,伽马蜡烷指数和4-甲基甾烷含量较低,具有一定特殊性(表1)。

### 3.2 原油生物标志化合物

#### 3.2.1 链烷烃

原油中链烷烃主要包括正构烷烃系列和类异戊二烯型烷烃,其分布与组成特征能提供有关生源、成熟度、沉积环境和原油降解等多方面的信息<sup>[11-12]</sup>。根据原油的生物标志化合物特征(图2,表1),临南洼陷原油样品主要峰型为双峰型,另外有少部分样品为前峰型和后峰型。陆生与水生类脂物比值为0.54~0.85;  $2nC_{29}/(nC_{28}+nC_{30})$  为1.06~1.23; CPI与OEP值接近1,为成熟原油特点。Pr/Ph值的高低可以指示烃源岩和原油沉积时的氧化还原条件<sup>[12,21]</sup>,临南洼陷原油的Pr/Ph为1.27~1.96,姥鲛烷略占优势,指示生油母质形成于弱还原的沉积环境。原油中Pr/nC<sub>17</sub>为0.25~0.42,

Ph/nC<sub>18</sub>为0.16~0.37,姥鲛烷、植烷远低于C<sub>17</sub>和C<sub>18</sub>。通过Pr/nC<sub>17</sub>和Ph/nC<sub>18</sub>相关图(图3a)指示有机质的沉积环境,可知沙四段原油有机质沉积环境全部为I类湖沼相成因,沙三段原油I类—II类均有分布,大部分为I类湖沼相成因,个别偏向II类淡水湖相成因。临南洼陷原油综合表现为沉积环境属于淡水、弱氧化—弱还原条件,主要为混合的有机质来源,即陆源和水生双重生源,少数以低等植物来源或陆生植物来源占优势。

#### 3.2.2 萜烷类化合物

长链三环萜烷比值  $(C_{28}+C_{29})/(C_{28}+C_{29}+Ts)$  在湖泊沉积环境中可以作为反映沉积水介质盐度的有效指标<sup>[13]</sup>。临南洼陷原油长链三环萜烷比值为0.35~0.60,升藿烷指数为0.18~0.28,伽马蜡烷指数为0.05~0.20,沉积环境为微咸水—淡水环境<sup>[13,22]</sup>;  $\alpha\beta C_{32} 22S/(22S+22R)$  值为0.52~0.62, Ts/Tm为0.32~2.20,莫烷/C<sub>30</sub>藿烷为0.12~0.18,指示原油均已进入成熟阶段<sup>[23-26]</sup>; C<sub>19</sub>/C<sub>23</sub>三环萜

表 1 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷原油地球化学参数

Table 1 Geochemical parameters of crude oils in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

井号	深度/m	层位	分带	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	$P_{17}$
商 544	3 182.4~3 188.0	$E_S^3$	北带	18.23	1.04	1.39	0.30	0.22	0.07	0.24	0.12	1.02	0.57	0.85	0.06	0.43	0.59	0.50	1.12	0.71
商 848	2 796.5~2 811.5	$E_S^3$	北带	25.77	1.03	1.43	0.49	0.37	0.07	0.27	0.17	0.32	0.33	0.76	0.09	0.56	0.50	0.42	1.85	0.58
商 852	2 952.0~2 955.0	$E_S^3$	北带	22.43	1.03	1.42	0.37	0.27	0.05	0.25	0.18	0.35	0.40	0.75	0.09	0.60	0.58	0.46	1.20	0.56
田 3-斜 10	3 094.0~3 106.3	$E_S^3$	北带	22.37	1.04	1.27	0.30	0.24	0.05	0.18	0.14	0.74	0.33	0.87	0.06	0.40	0.60	0.48	0.84	0.70
街 202	3 761.9~3 797.6	$E_S^3$	南带	8.84	1.04	1.84	0.35	0.20	0.09	0.23	0.18	0.78	0.44	0.88	0.09	0.41	0.60	0.50	1.89	0.59
街 202	3 913.2~3 920.3	$E_S^3$	南带	8.87	1.04	1.70	0.27	0.16	0.15	0.23	0.18	1.78	0.52	0.84	0.09	0.40	0.68	0.62	2.75	0.42
街 204	3 801.1~3 808.0	$E_S^3$	南带	10.53	1.04	1.52	0.29	0.20	0.11	0.19	0.14	1.34	0.53	1.17	0.06	0.39	0.66	0.60	1.10	0.65
街斜 2	4 019.7~4 025.6	$E_S^3$	南带	10.20	1.04	1.64	0.28	0.18	0.11	0.18	0.16	1.30	0.45	1.08	0.06	0.35	0.66	0.61	1.12	0.65
曲 15	1 925.0~1 925.8	$E_S^3$	南带	31.62	1.03	1.28	0.35	0.28	0.06	0.22	0.15	0.59	0.31	0.87	0.06	0.42	0.60	0.50	2.31	0.58
夏 33	3 374.5~3 409.2	$E_S^3$	南带	8.50	1.03	1.96	0.42	0.24	0.07	0.26	0.16	0.55	0.32	0.94	0.09	0.38	0.61	0.52	4.36	0.54
夏 72	3 551.0~3 555.5	$E_S^3$	南带	11.46	1.03	1.80	0.35	0.21	0.09	0.21	0.16	0.83	0.43	1.00	0.07	0.41	0.65	0.54	3.69	0.49
夏 503	3 389.0~3 418.4	$E_S^3$	南带	17.45	1.03	1.48	0.31	0.22	0.11	0.20	0.14	1.45	0.39	0.67	0.07	0.36	0.69	0.60	3.68	0.40
夏 509	3 107.3~3 117.0	$E_S^3$	南带	7.05	1.03	1.67	0.34	0.22	0.10	0.21	0.15	1.26	0.36	0.78	0.07	0.40	0.68	0.60	3.73	0.50
夏 941	4 001.0~4 025.0	$E_S^3$	南带	16.42	1.04	1.39	0.26	0.20	0.20	0.26	0.15	2.20	0.44	0.68	0.10	0.41	0.68	0.60	2.88	0.25
夏 942	3 630.7~3 633.7	$E_S^3$	南带	9.20	1.04	1.49	0.32	0.23	0.09	0.19	0.14	1.07	0.42	0.64	0.05	0.40	0.66	0.60	3.28	0.45
夏 942	3 780.0~3 785.0	$E_S^3$	南带	15.88	1.04	1.49	0.34	0.24	0.10	0.19	0.14	1.07	0.30	0.72	0.05	0.41	0.62	0.56	2.29	0.51
夏 46	3 351.0~3 356.4	$E_S^4$	南带	9.90	1.04	1.31	0.25	0.20	0.10	0.19	0.13	1.52	0.43	0.92	0.07	0.36	0.70	0.61	2.43	0.40
夏 66	3 627.4~3 633.9	$E_S^4$	南带	9.14	1.04	1.33	0.27	0.21	0.17	0.28	0.18	2.95	0.54	0.87	0.09	0.35	0.73	0.66	3.21	0.33
夏 509	3 256.6~3 261.0	$E_S^4$	南带	15.33	1.03	1.77	0.34	0.20	0.11	0.20	0.16	0.96	0.46	0.80	0.07	0.45	0.68	0.57	3.74	0.42
夏 510	3 246.3~3 256.4	$E_S^4$	南带	6.54	1.03	1.50	0.34	0.24	0.09	0.23	0.13	1.18	0.36	0.97	0.06	0.42	0.69	0.61	3.51	0.48

注:  $P_1$ . 胶质+沥青质;  $P_2$ . 碳优势指数;  $P_3$ . Pr/Ph;  $P_4$ . Pr/nC<sub>17</sub>;  $P_5$ . Ph/nC<sub>18</sub>;  $P_6$ . 伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷;  $P_7$ . C<sub>32</sub>/C<sub>35</sub>藿烷;  $P_8$ . C<sub>30</sub>莫烷/C<sub>30</sub>藿烷;  $P_9$ . Ts/Tm;  $P_{10}$ . C<sub>19</sub>/C<sub>23</sub>三环藿烷;  $P_{11}$ . C<sub>25</sub>/C<sub>26</sub>三环藿烷;  $P_{12}$ . 奥利烷/C<sub>30</sub>藿烷;  $P_{13}$ . 长链三环藿烷比值;  $P_{14}$ . C<sub>29</sub>20S/(20S+20R)甾烷;  $P_{15}$ . C<sub>29</sub> $\alpha\beta\beta$ 甾烷;  $P_{16}$ . 4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>R;  $P_{17}$ . 1,2,7-1,2,6-三甲萜。

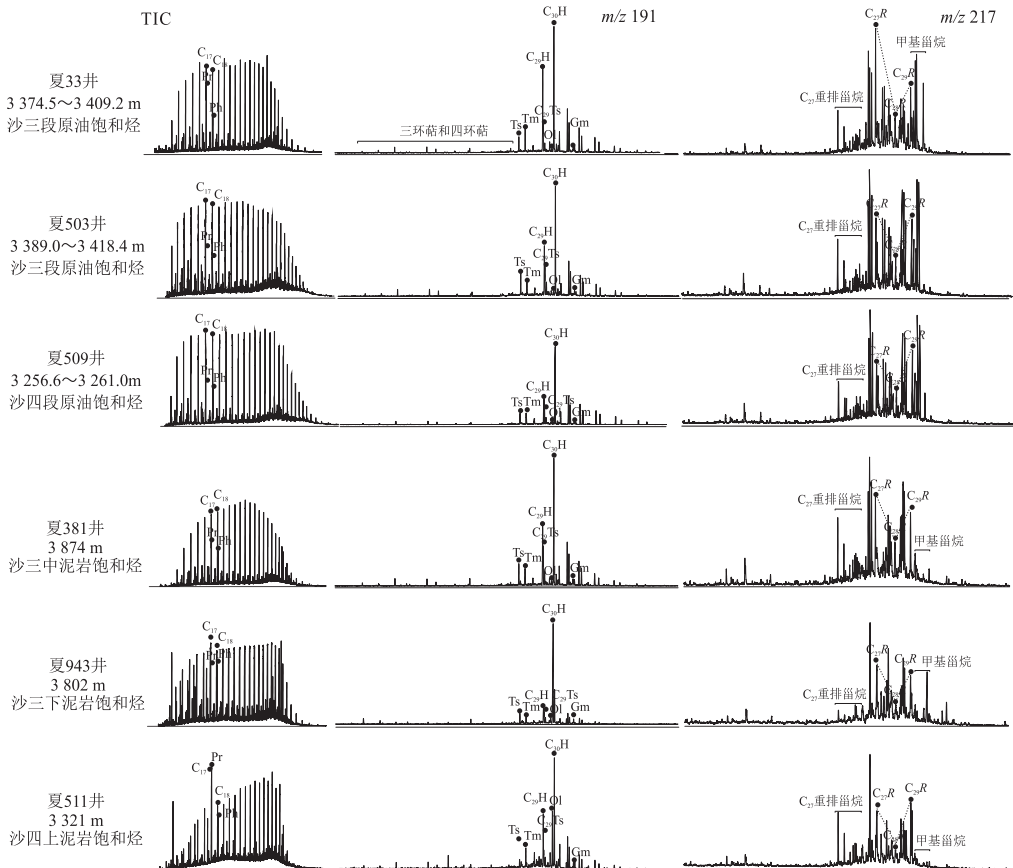


图 2 渤海湾盆地临南洼陷典型原油与烃源岩饱和烃生物标志化合物质量色谱

Fig.2 Total ion chromatograms and extracted-ion-chromatograms ( $m/z$  217 and  $m/z$  191) of saturated hydrocarbons of crude oils and source rock extracts in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

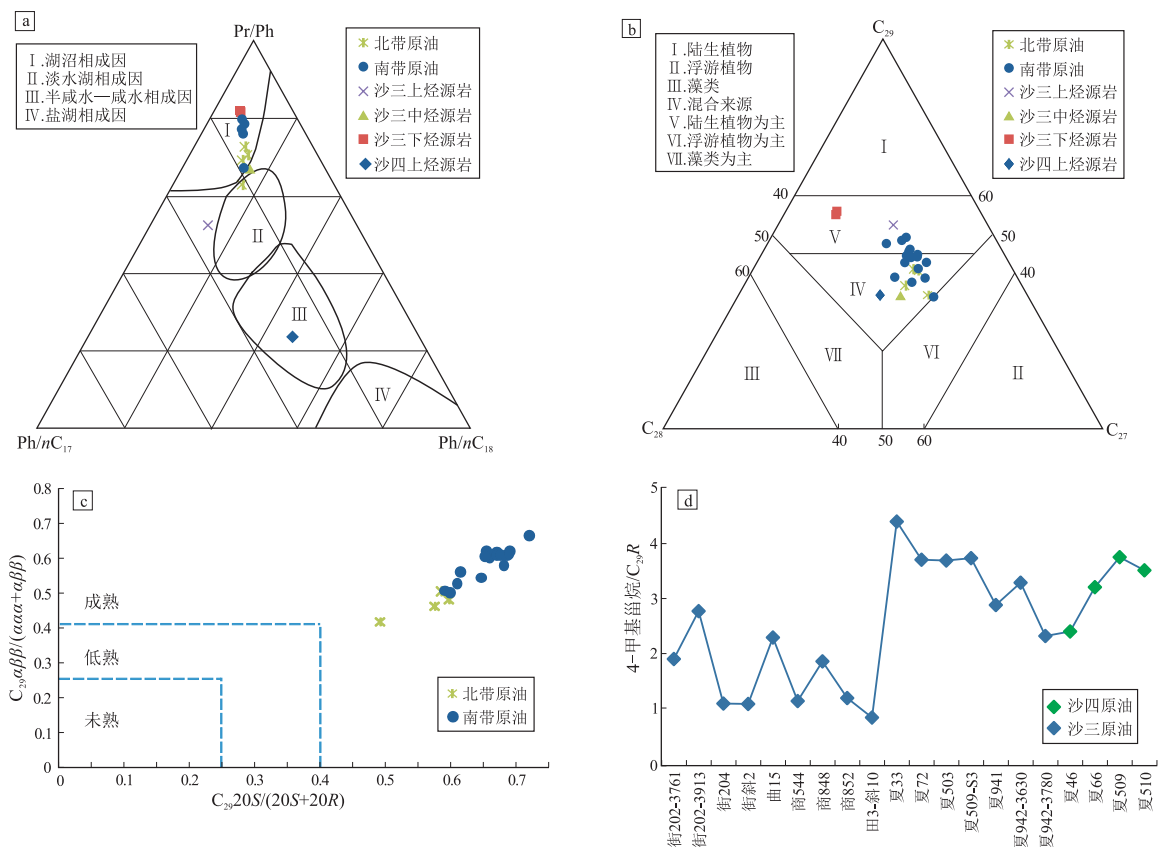


图 3 渤海湾盆地临南洼陷原油及烃源岩 Pr/Ph-Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub>三角图(a)、C<sub>27</sub>-C<sub>28</sub>-C<sub>29</sub>规则甾烷三角图(b)、C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ)和 C<sub>29</sub>20S/(20S+20R)相关图(c)、4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>R 含量分布图(d)

Fig.3 Ternary diagram of Pr/Ph-Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub>(a), ternary diagram of C<sub>27</sub>-C<sub>28</sub>-C<sub>29</sub> regular steranes (b),

C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ) versus C<sub>29</sub>20S/(20S+20R) sterane ratios (c), distribution of

Σ4-methyl steranes/C<sub>29</sub> regular steranes (d) of crude oils and source rock extracts in Linnan Sub-Sag, Bohai bay Basin

为 0.30~0.57, C<sub>25</sub>/C<sub>26</sub> 三环萜为 0.64~1.17, 奥利烷/C<sub>30</sub> 藿烷为 0.05~0.10, 陆源高等植物贡献相对较低。其中,沙三段原油 Ts/Tm 为 0.32~2.20,沙四段原油 Ts/Tm 为 0.96~2.95,指示沙四段原油成熟度更高;沙三段与沙四段原油的 C<sub>19</sub>/C<sub>23</sub> 三环萜烷比值分别为 0.30~0.57 和 0.36~0.54,指示沙三、沙四段原油的生烃母质具有相似的高等植物物质贡献<sup>[11,13]</sup>;原油在 C<sub>19-29</sub> 的三环萜烷中 C<sub>21</sub>、C<sub>23</sub>、C<sub>29</sub> 含量较高,这样的碳数分布特征与图 3a 得到的湖沼相沉积环境相符合。

### 3.2.3 甾烷类化合物

规则甾烷 ααα20RC<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 的分布指示有机质来源,普遍的认识是 C<sub>27</sub> 甾烷通常来源于低等水生生物和藻类,C<sub>29</sub> 甾烷来源于藻类和陆源高等植物<sup>[17,21,27]</sup>。在临南洼陷原油中,规则甾烷 ααα20RC<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 的分布主要有 3 种类型:“L”型分布、“反 L”型分布和“V”型分布(图 2)。C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 相对含量可以用于划分有机质来源(图 3b)。沙四段原油为 IV-V 型,相对于沙三段原油有更多的陆生植物贡献;沙三段原油在 IV-V-VI

区域均有分布,主要为 IV 型混合来源。前人研究认为,C<sub>29</sub>20S/(20S+20R) 和 C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ) 可以指示原油成熟度<sup>[22-23,28]</sup>,比值在 0.25 以下为未熟油,0.25~0.40 为低熟油,大于 0.40 为成熟油。以 C<sub>29</sub>20S/(20S+20R) 为横坐标,C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ) 为纵坐标作图(图 3c),得到沙三、沙四段原油均为成熟原油。

在临南洼陷的沙三、沙四段原油样品中发现均含有一定数量的 4-甲基甾烷(图 3d)。据前人研究,4-甲基甾烷与沟鞭藻类的勃发有关<sup>[22,29-31]</sup>,已有研究证实渤海湾盆地沙三下亚段烃源岩为滨浅湖—深湖相沉积,富含沟鞭藻类渤海藻属和副渤海藻属<sup>[32]</sup>。沟鞭藻的生长环境比较复杂,有学者认为沟鞭藻主要繁盛于淡水沉积环境<sup>[22,29]</sup>,也有研究者认为沟鞭藻可形成于陆相咸化水体环境<sup>[33]</sup>。结合图 3a 可以认为研究区原油中的 4-甲基甾烷来源于淡水湖泊相的沟鞭藻,而不同原油中的 4-甲基甾烷丰度反映了其母质来源中沟鞭藻贡献的差异性。沙四段原油的 4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>R 为 2.43~3.74,沙三段原油为 0.84~4.36,但是沙三段原油的

4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>R 较分散,沙三段原油的原始沉积母质具有相对较多的沟鞭藻类的贡献,同时可能受到沉积相带变化的影响。

## 4 烃源岩地化特征

### 4.1 烃源岩有机质丰度

根据泥岩中总有机碳含量数据,发现沙三段泥岩总有机碳含量较高,为 0.28%~10.51%,平均值为 4.03%。各层位总有机碳含量分布有差异,沙三上亚段平均值为 4.28%,中亚段为 2.36%~3.83%,平均值为 3.10%,下亚段为 0.28%~10.51%,平均值为 4.44%;沙四段则为 0.51%~1.69%,平均值为 1.10%。总体上,沙三下亚段泥岩有机质丰度最高,沙三上、中亚段其次,沙四段泥岩有机质丰度最低,此结论与前人研究得出的临南洼陷各层生排烃强度相符合<sup>[5]</sup>。

### 4.2 干酪根类型及热成熟度

依据最大热解峰温与氢指数关系进行有机质类型划分<sup>[11]</sup>(图 4a)。沙三段有机质以 II 型为主,II<sub>1</sub>型与 II<sub>2</sub>型均有分布。个别样品(夏 503 井)为 III 型,因为氢指数为 29 mg/g,非常低的氢指数和可溶烃 S<sub>1</sub>

接近 0 mg/g,表明其具有特殊性。而沙四段的有机质类型全部为 III 型。利用干酪根镜质组反射率(R<sub>o</sub>)与深度关系图(图 4b)分析烃源岩的成熟度<sup>[11,34]</sup>可知,低成熟(R<sub>o</sub>=0.5%~0.7%)的深度范围在 2 500~3 100 m,中等成熟(R<sub>o</sub>=0.7%~1.3%)的深度范围在 3 100~4 200 m,沙四段和沙三段烃源岩处在低成熟—中等成熟阶段。

从有机质丰度、类型和成熟度评价沙四段和沙三段烃源岩可知,临南洼陷沙三段主要为中等—很好烃源岩,沙四段为差—中等烃源岩<sup>[34]</sup>。临南洼陷的主力生油岩层位为沙三下、中亚段,具有有机质类型好、总有机碳含量高、生烃潜力高、成熟度处于生油窗等特征。

### 4.3 烃源岩中可溶有机物生标特征

根据泥岩氯仿抽提物的生物标志化合物特征(图 2,表 2),沙四上亚段烃源岩样品 Pr/nC<sub>17</sub>、Ph/nC<sub>18</sub>、奥利烷和重排甾烷含量较高,规则甾烷含量 C<sub>27</sub><C<sub>28</sub><C<sub>29</sub>,Ts/Tm、C<sub>29</sub>20S/(20S+20R)和 C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ)较高,而 Pr/Ph 和 4-甲基甾烷含量较低,说明沙四上亚段烃源岩有机质为陆源高等植物输入为主的混合来源,水体为低盐度还原

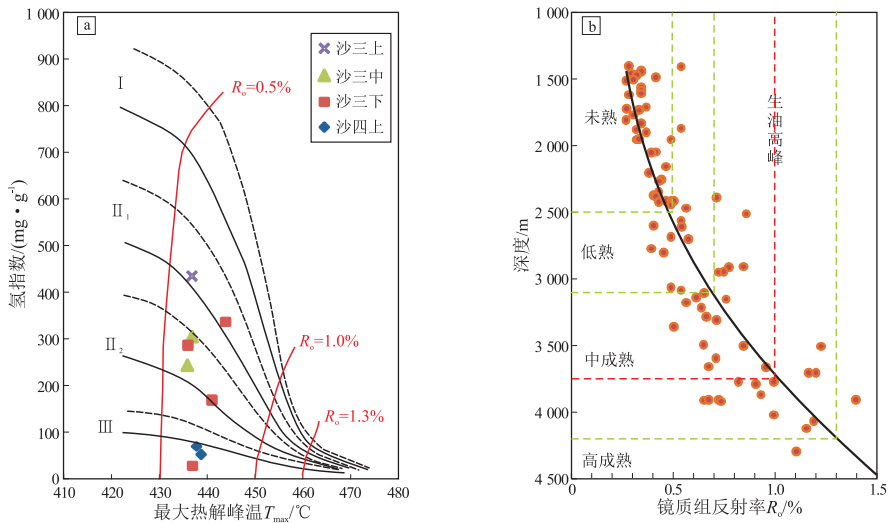


图 4 渤海湾盆地临南洼陷烃源岩有机质类型(a)、成熟度(b)相关图

Fig.4 Organic matter type (a) and vitrinite reflectance (b) of source rocks in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

表 2 渤海湾盆地临南洼陷烃源岩生物标志物参数

Table 2 Biomarker parameters of source rock extracts in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

井号	深度/m	层位	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	P <sub>16</sub>	P <sub>17</sub>
夏 942	3 201	沙三上	34.13	1.05	3.00	1.99	0.77	0.11	0.16	0.32	0.30	0.36	0.16	0.15	0.22	0.28	0.23	0.22	1.45
夏 381	3 874	沙三中	19.17	1.03	1.15	0.30	0.26	0.05	0.13	0.15	1.24	0.47	0.21	0.03	0.19	0.45	0.58	0.89	0.52
夏 943	3 802	沙三下		1.03	1.73	0.25	0.13	0.14	0.12	0.23	0.53	0.53	0.21	0.23	0.43	0.36	0.67	0.87	0.41
夏 511	3 321	沙四上	34.29	1.02	0.80	1.00	1.61	0.06	0.14	0.24	0.44	0.38	0.41	0.48	0.37	0.50	0.31	0.47	0.34

注: P<sub>1</sub>. 胶质+沥青质; P<sub>2</sub>. 碳优势指数; P<sub>3</sub>. Pr/Ph; P<sub>4</sub>. Pr/nC<sub>17</sub>; P<sub>5</sub>. Ph/nC<sub>18</sub>; P<sub>6</sub>. 伽马蜡烷/C<sub>30</sub>甾烷; P<sub>7</sub>. C<sub>32</sub>/C<sub>35</sub>甾烷; P<sub>8</sub>. C<sub>30</sub>莫烷/C<sub>30</sub>藿烷; P<sub>9</sub>. Ts/Tm; P<sub>10</sub>. C<sub>19</sub>/C<sub>23</sub>三环藿烷; P<sub>11</sub>. C<sub>25</sub>/C<sub>26</sub>三环藿烷; P<sub>12</sub>. 奥利烷/C<sub>30</sub>藿烷; P<sub>13</sub>. 长链三环藿烷比值; P<sub>14</sub>. C<sub>29</sub>20S/(20S+20R)甾烷; P<sub>15</sub>. C<sub>29</sub>αββ/(ααα+αββ)甾烷; P<sub>16</sub>. 4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>R; P<sub>17</sub>. 1,2,7-1,2,6-三甲苯。

环境,有机质已进入成熟阶段。沙三下亚段的  $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$ 、 $Ph/nC_{18}$  和奥利烷含量较高,重排甾烷含量低,规则甾烷含量  $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 、 $Ts/Tm$ 、 $C_{29} 20S/(20S+20R)$  和  $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$  较高,4-甲基甾烷含量较低,表明沙三下亚段烃源岩有机质以陆源高等植物输入为主,弱氧化—弱还原淡水环境,有机质已进入成熟阶段。沙三中亚段的  $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  以及奥利烷含量较低,重排甾烷含量较高,规则甾烷含量  $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 、 $Ts/Tm$ 、 $C_{29} 20S/(20S+20R)$  和  $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$  均较高,4-甲基甾烷含量中等,表明沙三中亚段烃源岩有机质为陆源高等植物输入占优势的混合来源,弱氧化—弱还原淡水环境,有机质已进入成熟阶段。沙三上亚段的  $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$ 、 $Ph/nC_{18}$ 、奥利烷和重排甾烷含量较高,规则甾烷含量  $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 、 $Ts/Tm$ 、 $C_{29} 20S/(20S+20R)$  和  $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$  相对较低,4-甲基甾烷含量较低,表明沙三上亚段烃源岩有机质为陆源高等植物输入为主的混合来源,弱氧化—氧化淡水环境,成熟度相较于沙三其他亚段偏低。

## 5 油源分析

### 5.1 油—油对比

临南洼陷可分为深洼带、深洼带南部和北部(图1)。根据临南洼陷20个原油的油—油原油生标参数分析结果(表1),该深洼带以北和以南的原油地化特征存在差异性,且表现出一定的规律性。

结合临南洼陷构造特征与原油地化特征(图1,表1),可将原油样品分为北带和南带2个具有不同生标特征的区带(图5)。北带原油中4-甲基甾烷/ $C_{29}R$ 、 $Ts/Tm$  以及伽马蜡烷指数较低,长链三环萜烷比和1,2,7-/1,2,6-三甲基萜较高,表明北带原油为淡水湖相成因,成熟度相对较低,有机质来源中沟鞭藻、被子植物贡献较少;南带原油中4-甲基甾烷/ $C_{29}R$ 、 $Ts/Tm$  以及伽马蜡烷指数普遍较高,长链三环萜烷比和1,2,7-/1,2,6-三甲基萜较低,表明该带原油为湖沼相成因,原油成熟度更高,生源以陆生植物为主,其中甲藻类贡献增加。临南洼陷在沙四段沉积末期初步形成中央隆起,后经改造,断层发育<sup>[5]</sup>。可以推测从南带到北带原油样品中4-甲基甾烷含量的变化与水体深度有关联,即从南带到北带水体变浅,被子植物生源贡献减少。

### 5.2 油—源对比

以夏33和503井(沙三段储层)和夏509井(沙四段储层)油样为典型代表,与附近井的烃源岩进行生物标志物对比(图2)。沙三下亚段与沙三中亚段烃源岩的峰型、 $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$ 、 $Ph/nC_{18}$ 、规则甾烷分布、奥利烷含量等均与原油非常相近(表1,2,图6a),在有机质来源、沉积环境方面均表现出与原油具有更好的亲缘关系,其他层段烃源岩则表现与原油亲缘关系较差。

聚类统计分析被普遍用于划分油族及油源对比<sup>[11-13,35]</sup>。基于不同的相似性(亲密性),即根据

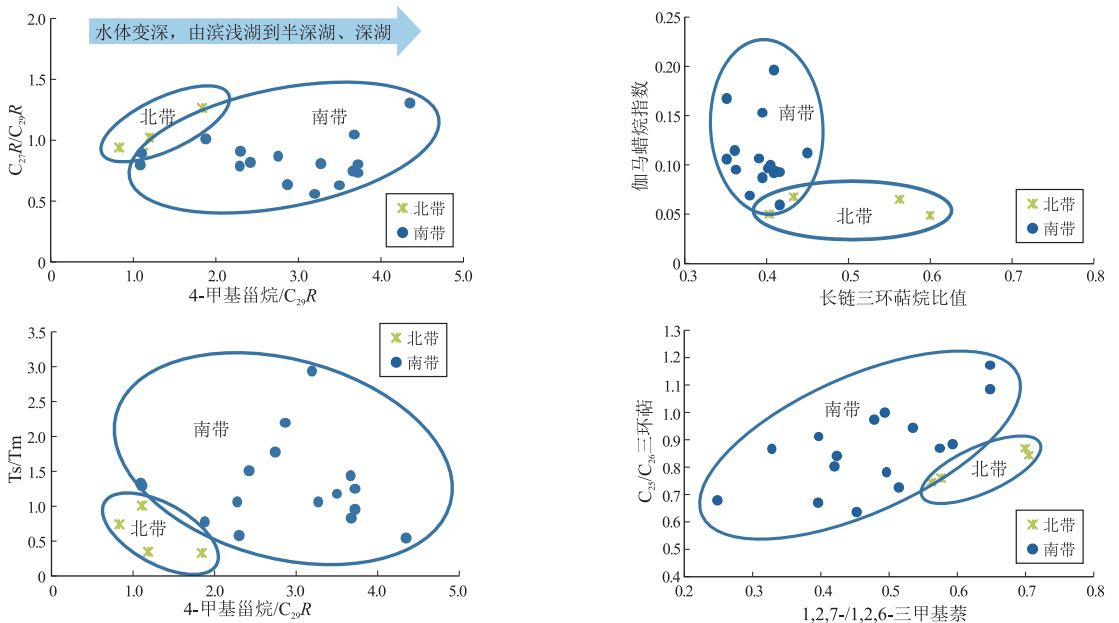


图5 渤海湾盆地临南洼陷原油生物标志化合物参数交会图

Fig.5 Biomarker parameters and their relationships of crude oils in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

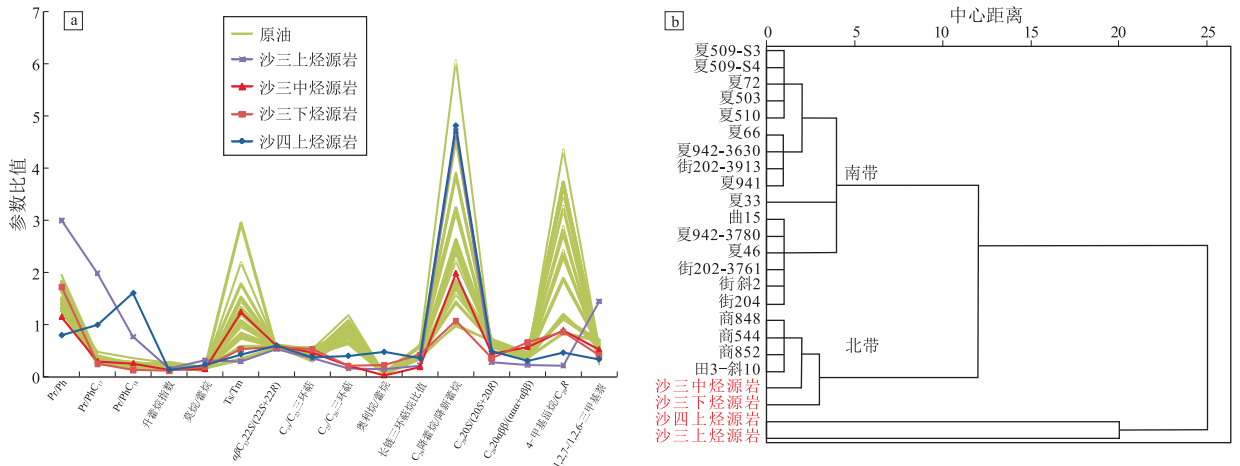


图 6 渤海湾盆地临南洼陷原油及烃源岩参数对比(a)与聚类谱系图(b)  
 Fig.6 Comparison of biomarker parameters (a) and cluster analysis (b) of oil-sources correlation in Linnan Sub-Sag, Bohai Bay Basin

原油生标参数找出能度量样品间相似程度的统计量,根据统计量计算样品间距离(相似性),具有较高相似性的原油聚合成一类,而相似性较差的原油被聚合成另一类<sup>[12]</sup>。本次研究参考前人的文献<sup>[17,21-28,36-39]</sup>选取与有机质来源、沉积环境和成熟度相关的 16 项地化参数(图 6a),对原油进行聚类分析,从宏观上反映原油类别和相近程度,对比分析各油族的成因与来源。由树形图(图 6b)可看出南带和北带原油被明显区别出来,沙三中亚段和沙三下亚段烃源岩与原油关系更加亲近,聚类分析结果与传统油—油、油—源对比中利用交会图(图 3)和谱图(图 2)对比得到的结果较为一致。总体看,聚类分析的手段能够识别原油类别以及烃源岩与原油亲缘关系。

## 6 结论

(1) 临南洼陷沙三、沙四段原油的生标特征非常相似,族组分含量以及生物标志物参数指标表明沙三、沙四段原油均已进入成熟阶段,其母质输入中陆源高等植物和低等水生生物都很丰富,具有陆相湖盆混合型母质特征。北带原油样品中 4-甲基甾烷/ $C_{29}R$ 、 $Ts/Tm$  以及伽马蜡烷指数较低,长链三环萜烷比值和 1,2,7-/1,2,6-三甲基萜较高;南带原油样品中 4-甲基甾烷/ $C_{29}R$ 、 $Ts/Tm$  以及伽马蜡烷指数普遍较高,长链三环萜烷比值和 1,2,7-/1,2,6-三甲基萜较低。反映了 2 个地区沉积水体、原油成熟度以及母质来源中沟鞭藻、被子植物贡献的差异性。

(2) 沙三段烃源岩有机质类型以 II 型为主,有机质丰度较高;沙四段烃源岩有机质类型为 III 型,

有机质丰度较低。主要生油期发生在 3 100~4 200 m ( $R_o=0.7\% \sim 1.3\%$ ),沙三和沙四段烃源岩均已处于成熟阶段。沙三中、下亚段是临南洼陷的主力烃源岩。

(3) 以典型原油样品为代表,通过色谱峰型和  $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$ 、 $Ph/nC_{18}$ 、奥利烷含量、1,2,7-/1,2,6-三甲基萜等参数与各烃源岩样品进行油源对比,应用多种参数进行聚类分析,表明临南洼陷沙三、沙四段原油主要来自于沙三下亚段、中亚段烃源岩。

### 参考文献:

[1] 刘建国.惠民凹陷临南斜坡带成藏条件分析[J].石油天然气学报,2009,31(4):19-22.  
 LIU Jianguo. Hydrocarbon accumulation conditions in Linnan Slope Belt of Huimin Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 19-22.

[2] 刘中云,唐洪三,林玉祥.渤海湾盆地临南地区有效油气运聚系统分析[J].高校地质学报,2000,6(3):447-455.  
 LIU Zhongyun, TANG Hongsan, LIN Yuxiang. Study of effective migration and accumulation system of oil in Linnan area, Bohai Gulf Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(3): 447-455.

[3] NI Jinlong, GUO Ying, WANG Zhimin, et al. Tectonics and mechanisms of uplift in the Central Uplift Belt of the Huimin Depression [J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(3): 299-315.

[4] LI Qing, JIANG Zaixing, LIU Keyu, et al. Factors controlling reservoir properties and hydrocarbon accumulation of lacustrine deep-water turbidites in the Huimin Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 327-344.

[5] 谭丽娟,蒋有录.渤海湾盆地东营—惠民凹陷油气成藏模式和油气富集控制因素[J].石油实验地质,2003,25(4):366-370.  
 TAN Lijuan, JIANG Youlu. Pool-forming patterns of hydrocarbon



- and controlling factors of hydrocarbon enrichment in the Dongying and the Huimin sags [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(4): 366-370.
- [6] 刘元晴,周乐,曾溅辉,等.惠民凹陷中央隆起带异常低压特征及成因分析[J]. *现代地质*, 2018, 32(1): 154-161.  
LIU Yuanqing, ZHOU Le, ZENG Jianhui, et al. Subnormal pressure characteristics and genesis analysis of the Central Uplift Belt in Huimin Sag [J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 154-161.
- [7] 刘超英,闫相宾,徐旭辉,等.应用流体包裹体研究惠民凹陷南斜坡油气充注史[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(4): 507-510.  
LIU Chaoying, YAN Xiangbin, XU Xuhui, et al. Application of fluid inclusion to the study of hydrocarbon charge history of the south slope in the Huimin Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(4): 507-510.
- [8] HAN Zuozhen, YANG Renchao, FAN Aiping, et al. Remaining oil distribution in Ng<sub>3</sub> bottom water reservoir of Lin 2-6 fault-block in Huimin Depression and potential tapping in horizontal well [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2009, 19(1): 102-107.
- [9] 杨子成,梁晓燕,姜洪涛,等.惠民凹陷沙四段烃源岩地球化学特征[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(6): 20-27.  
YANG Zicheng, LIANG Xiaoyan, JIANG Hongtao, et al. Geochemical characteristics of the source rocks from Es<sub>4</sub> member in Huimin Depression [J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(6): 20-27.
- [10] LIU Zerong, XIN Quanlin, WANG Yongjie, et al. Formation conditions and distribution regularities of oil-gas pools in Tertiary volcanic rocks in western Huimin Depression, Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1989, 8(2): 146-154.
- [11] LIU Qingxin, SONG Yan, JIANG Lin, et al. Geochemistry and correlation of oils and source rocks in Banqiao Sag, Huanghua Depression, northern China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 176-177: 49-68.
- [12] EL DIASTY W S, EL BEIALY S Y, ANWARI T A, et al. Organic geochemistry of the Silurian Tanezzuft Formation and crude oils, NC115 Concession, Murzuq Basin, southwest Libya [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 367-385.
- [13] 杨帆,王权,郝芳,等.冀中坳陷饶阳凹陷北部烃源岩生物标志物特征与油源对比[J/OL]. *地球科学*. (2018-12-03) [2019-07-17]. <https://www.cnki.net/KCMS/detail/42.1874.P.20181130.1333.002.html>.  
YANG Fan, WANG Quan, HAO Fang, et al. Biomarker characteristics of source rock and oil; correlation in Raoyang Depression, Jizhong Sub-Basin [J/OL]. *Earth Science*. (2018-12-03) [2019-07-17]. <https://www.cnki.net/KCMS/detail/42.1874.P.20181130.1333.002.html>.
- [14] 覃利娟.惠民凹陷古近系深层储层成岩作用及其对储层性质的影响[D].青岛:中国海洋大学,2007.  
QIN Lijuan. Diagenesis and its impact on the reservoir quality of deep reservoir from Paleogene in Huimin Depression [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [15] 国家发展和改革委员会.岩石中氯仿沥青的测定:SY/T 5118-2005[S].北京:石油工业出版社,2005.  
National Development and Reform Commission. Determination of bitumen from rocks by chloroform extraction: SY/T 5118-2005[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.气相色谱-质谱法测定沉淀物和原油中生物标志物:GT/T 18606-2001[S].北京:中国标准出版社,2004.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. The standard test method for biomarker in sediment and crude oil by GC-MS: GT/T 18606-2001[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2004.
- [17] HAKIMI M H, AL-SUFI S A. Organic geochemistry investigations of crude oils from Bayoot oilfield in the Masila Basin, east Yemen and their implication for origin of organic matter and source-related type [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2018, 27(1): 37-54.
- [18] 孔婷,张敏. C<sub>4</sub>-C<sub>8</sub>轻烃在原油地球化学研究中的应用;以塔里木盆地大宛齐油田凝析油为例[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 535-543.  
KONG Ting, ZHANG Min. Application of C<sub>4</sub>-C<sub>8</sub> light hydrocarbons in geochemical studies; a case of condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(4): 535-543.
- [19] 林会喜,郭瑞超,官亚军,等.哈山地区原油地化特征及同源双向充注效应[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(2): 35-39.  
LIN Huixi, GUO Ruichao, GONG Yajun, et al. Geochemical characteristics of crude oil and cogenetic-bidirectional charging effect in Hashan area [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(2): 35-39.
- [20] 李田田,常象春,王亚鹏.基于全二维气相色谱的原油 C<sub>8</sub>轻烃新参数[J]. *断块油气田*, 2017, 24(5): 618-622.  
LI Tiantian, CHANG Xiangchun, WANG Yapeng. New C<sub>8</sub> light hydrocarbons parameters based on comprehensive two-dimensional gas chromatography [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(5): 618-622.
- [21] BRITO M, RODRIGUES R, BAPTISTA R, et al. Geochemical characterization of oils and their correlation with Jurassic source rocks from the Lusitanian Basin (Portugal) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 85: 151-176.
- [22] DAMSTÉ J S 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(9): 1895-1900.
- [23] MASHHADI Z S, RABBANI A R. Organic geochemistry of crude oils and Cretaceous source rocks in the Iranian sector of the Persian Gulf; an oil-oil and oil-source rock correlation study [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 146: 118-144.
- [24] 葛海霞,张枝焕,闵伟.渤海湾盆地青东凹陷古近系原油地球化学特征及油源分析[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(3): 383-389.  
GE Haixia, ZHANG Zhihuan, MIN Wei. Geochemical characteristics and oil-source correlation of Paleogene oils in Qingdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*,

2017,39(3):383-389.

[25] 杨尚儒,高岗,张永超,等.南堡 2 号构造带中浅层油源对比及原油运聚模式[J].油气地质与采收率,2018,25(1):30-36. YANG Shangru,GAO Gang,ZHANG Yongchao, et al. Oil-source correlation and model of migration and accumulation of shallow-middle crude oil in No.2 Structural Belt,Nanpu Sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(1):30-36.

[26] 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.

[27] EL DIASTY W S,GHONAIM A A A,MOSTAFA A R, et al. Biomarker characteristics of the Turonian-Eocene succession, Belayim oilfields, central Gulf of Suez, Egypt[J].Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences,2016,19:91-100.

[28] 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 Derui,WU Kui,ZHANG Rucai, 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.

[29] WOLFF G A,LAMB N A,MAXWELL J R.The origin and fate of 4-methyl steroid hydrocarbons. I. Diagenesis of 4-methyl sterenes[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1986,50(3):335-342.

[30] 彼得斯 K E,沃尔特斯 C C,莫尔多万 J M.生物标志化合物指南[M].张水昌,李振西,译.北京:石油工业出版社,2011. PETERS K E,WALTERS C C,MOLDOWAN J M.The biomarker guide[M].ZHANG Shuichang,LI Zhenxi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press,2011.

[31] BOREHAM C J,SUMMONS R E,ROKSANDIC Z, et al.Chemical, molecular and isotopic differentiation of organic facies in the Tertiary lacustrine Duinga oil shale deposit, Queensland, Australia [J]. Organic Geochemistry,1994,21(6/7):685-712.

[32] 咎灵,张枝焕,王顺华,等.4-甲基甾烷在油源对比中的应用:以渤南洼陷北部陡坡带为例[J].沉积学报,2012,30(4):770-778. ZAN Lin,ZHANG Zhihuan,WANG Shunhua, et al.Application

of 4-methyl steranes in oil-source correlation:a case study from northern steep slope zone of Bonan Sag[J].Acta Sedimentologica Sinica,2012,30(4):770-778.

[33] FU Jiamo,SHENG Guoying,XU Jiayou, et al.Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments[J].Organic Geochemistry,1990,16(4/6):769-779.

[34] DONG Tian,HE Sheng,YIN Shiyun, et al.Geochemical characterization of source rocks and crude oils in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Changling Sag, southern Songliao Basin[J].Marine and Petroleum Geology,2015,64:173-188.

[35] CHENG Xiong,MAO Zhichao,MAO Rong, et al.Families of reservoir crude oils from the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J].Organic Geochemistry,2018,122:115-125.

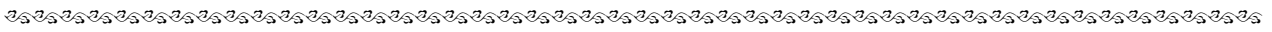
[36] 张海,雷华伟,张涛,等.鄂尔多斯盆地靖边油田西部延 9 原油地球化学特征与油源[J].石油实验地质,2018,40(6):836-842. ZHANG Hai,LEI Huawei,ZHANG Tao, et al. Geochemical characteristics of Yan 9 crude oil and oil-source correlation in western Jingbian Oil Field,Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(6):836-842.

[37] 王权,王道军,邹华耀,等.霸县凹陷古近系烃源岩生物标志化合物特征及对油气成藏的贡献[J].油气地质与采收率,2017,24(6):17-24. WANG Quan,WANG Daojun,ZOU Huayao, et al.Development characteristics of biomarkers in Paleogene source rocks and its significance to petroleum accumulation in the Baxian Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(6):17-24.

[38] 彭清华,杜佰伟,谢尚克,等.羌塘盆地昂达尔错地区侏罗系烃源岩生物标志物特征及其指示意义[J].石油实验地质,2017,39(3):370-376. PENG Qinghua,DU Baiwei,XIE Shangke, et al.Biomarker characteristics of Jurassic source rocks in Angdaro area in Qiangtang Basin and their significance [J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(3):370-376.

[39] 林红梅.渤海湾盆地车镇凹陷下古生界烃源岩生物标志物特征[J].石油实验地质,2017,39(2):230-237. LIN Hongmei.Biomarker characteristics of Lower Paleozoic source rocks in Chezhen Sag,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(2):230-237.

(编辑 韩 彧)



(上接第 837 页)

[20] YAMAMOTO K. Production techniques for methane hydrate resources and field test programs [J].Journal of Geography, 2009,118(5):913-934.

[21] COLWELL F, MATSUMOTO R, REED D. A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough [J]. Chemical Geology, 2004, 205(3/4):391-404.

[22] ITO T, KOMATSU Y, FUJII T, et al. Lithological features of hydrate-

bearing sediments and their relationship with gas hydrate saturation in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66:368-378.

[23] KIDA M, JIN Y, WATANABE M, et al. Chemical and crystallographic characterizations of natural gas hydrates recovered from a production test site in the eastern Nankai Trough [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66:396-403.

(编辑 黄 娟)