

文章编号:1673-5005(2008)06-0040-07

渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比

梅玲¹, 张枝焕¹, 王旭东², 杨永才¹, 刘洛夫¹, 赵彦德¹

(1. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249;

2. 中石油冀东油田公司 勘探开发研究院, 河北 唐山 063004)

摘要:在原油地球化学特征精细剖析和对比的基础上,划分了南堡凹陷原油的成因类型,并根据生物标志物组合特征对原油和烃源岩进行了对比研究。结果表明:不同构造带或同一构造带不同层位原油的地球化学特征均存在一定的差别,据此可将原油划分为6类,其中第I类主要分布于柳赞油田和高尚堡油田、老爷庙油田浅层明化镇组和馆陶组油层,第II类主要分布在高尚堡(高柳断层以南)、老爷庙和北堡油田东营组油层,第III类主要分布在柳赞油田及高尚堡油田(高柳断层以北)沙河街组油层,第IV类主要分布于滩海区东一段油层,第V、VI类主要分布在滩海区奥陶系油层中;古近系3套烃源岩对不同构造带的油气聚集有不同的贡献,其中高柳构造带高柳断层以北地区的原油主要来源于沙三段烃源岩,断层以南的主要来自于沙一段和东三段烃源岩,部分混有沙三段烃源岩的贡献,老爷庙和北堡构造的原油主要来源于东三段和沙一段烃源岩,混有部分沙三段烃源岩生成的原油,滩海区原油主要来自于沙一段和沙三段烃源岩。

关键词:原油; 烃源岩; 油-源对比; 生物标志物; 南堡凹陷

中图分类号:TE 132.4 **文献标识码:**A

Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin

MEI Ling¹, ZHANG Zhi-huan¹, WANG Xu-dong², YANG Yong-cai¹, LIU Luo-fu¹, ZHAO Yan-de¹

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Education Ministry in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Exploration & Production Research Institute, Eastern Hebei Oilfield, PetroChina, Tangshan 063004, China)

Abstract: The types of crude oil formed in Nanpu sag were classified on the basis of delicate geochemical correlation. The correlation between crude oil and hydrocarbon source rocks was also researched by combined characteristics of biomarkers. It is shown that there are six types of the crude oils in Nanpu sag, which have different compositional characteristics. The type I oil occurs in the Nm and Ng in Liuzan, Gaoshangpu and Laoyemiao Oilfield. The type II oil occurs in Ed of Gaoshangpu, Laoyemiao and Beipu Oilfield. The type III oil occurs in Liuzan Oilfield and Gaoshangpu Oilfield in the north of Gaoliu fault. The type IV oil occurs in Ed reservoir. And the type V and VI oil occur in Ordovician reservoir. The results show that these three series of hydrocarbon source rocks have different contribution to different conformation. The oils of Liuzan Oilfield and part oil of Gaoshangpu Oilfield are mainly sourced from source rocks of Es₃ in the north of Gaoliu fault, others are derived from Es₁ and Ed₃, partly from Es₃. The oils of Laoyemiao and Beipu Oilfield are mainly formed from Es₁ and Ed₃, partly from Es₃. The oils of beach area are mainly derived from Es₁ and Es₃.

Key words: crude oil; hydrocarbon source rock; oil-source correlation; biomarkers; Nanpu sag

南堡凹陷是渤海湾盆地黄骅拗陷北部的一个小型含油气构造单元,是在华北地台基底上,经中、新生代断块运动而发育起来的一个中生界北断南超、东断西超的复合箕状凹陷。凹陷经历了断陷期

收稿日期:2008-07-15

基金项目:中国石油大学(北京)与冀东油田公司合作项目(JDYJ-2006-JS-0026)

作者简介:梅玲(1978-),女(汉族),新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要从事油气地球化学研究工作。

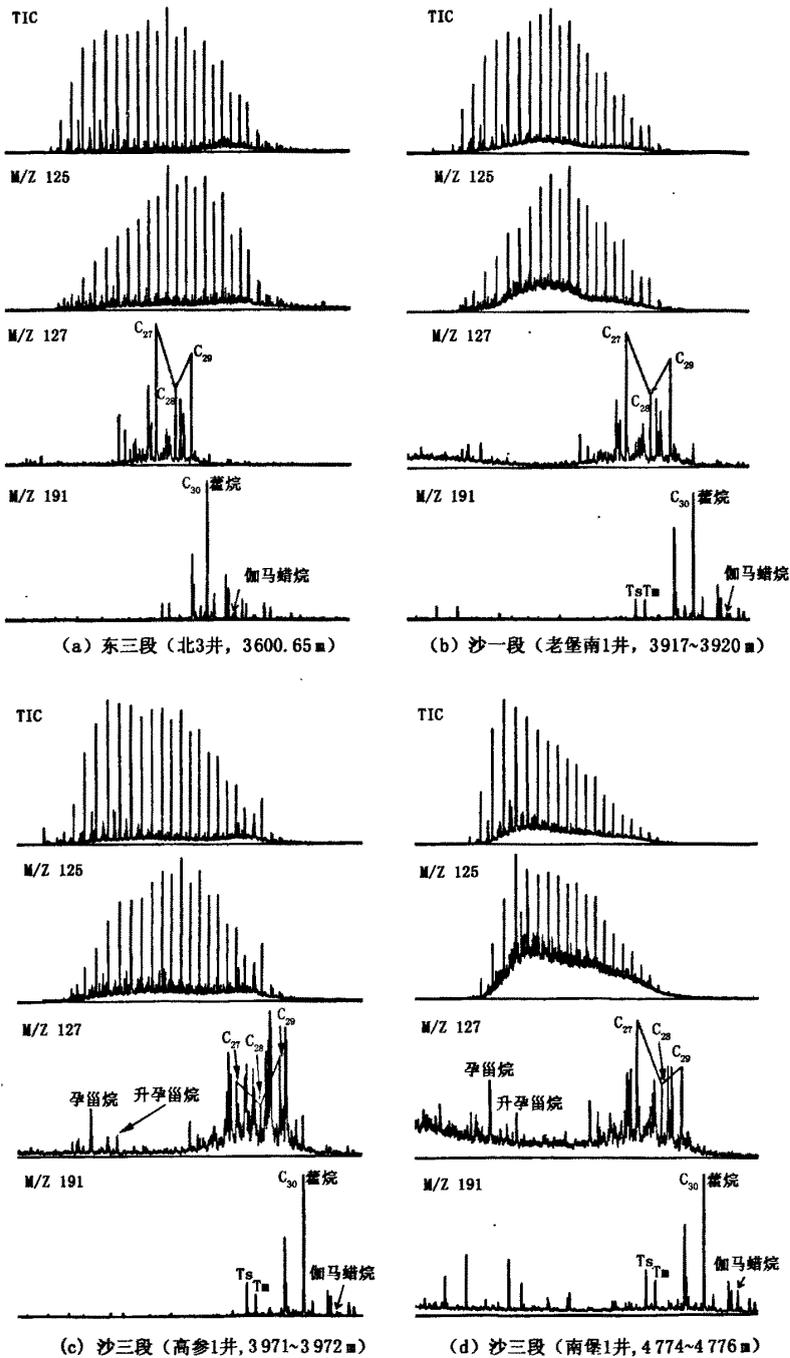
和坳陷期两个演化阶段,具幕式沉积特点。东以柏各庄断裂为界,与柏各庄凸起,马头营凸起及石臼坨凹陷邻接,北以西南庄断裂为界,与柏各庄凸起和老王庄凸起相接,南与沙垒田凸起相接,西与北塘凹陷接壤。自北向南依次为拾场次凹、高尚堡-柳赞构造带、柳南次凹、北堡-老爷庙构造带、林雀次凹、中央凸起带(包括南堡构造带、老堡构造带和蛤坨构造带)和曹妃甸次凹。主力烃源岩层为东三段、沙一段和沙三段,含油层系主要包括新近系明化镇组、馆陶组、古近系东一段、东三段、沙三段和前第三系奥陶系等6套。目前已在区内发现了柳赞、高尚堡、老爷庙、北堡和滩海等油田。南堡凹陷原油具有典型的陆相原油特征^[1],油源特征具有明显的平面分区性。研究表明^[2,4],高柳断层以北地区,油气主要来自于沙三段,高柳断层以南、以西地区,油气主要来自于东三段和沙一段,表现为混源特征,滩海区的东营组原油来源于沙一段,奥陶系潜山原油来自沙三段。近年来在南堡凹陷陆续发现了大量的油气资源,使得对于南堡凹陷原油的油源备受关注。笔者在前人研究的基础上,根据原油、油砂抽提物中饱和烃分子标志物组成特征对研究区不同类型的原油进行系统、精细的油源对比分析。

1 烃源岩的生物标志物组合特征

生物标志物组合特征受到有机质生源输入、沉积环境和有机质热演化程度等多重因素的制约^[5],南堡凹陷东三段、沙一段和沙三段等主要烃源岩形成时期沉积环境变化较明显。沙三五亚段沉积时期主要控凹边界断层(如柏各庄断层、西南庄断层)开始活动,盆地发育成为浅的箕状凹陷,以现今的拾场次凹为主,并向南西方向超覆,发育一套较干旱气候条件下的以红色泥岩、灰绿色泥岩和粗碎屑岩为主的冲积扇沉积。沙三四亚段至沙二段沉积中心在高尚堡构造带以北和柳赞构造带以西地区,其沉积范围扩大至老爷庙和北堡地区,气候潮湿,发育以砾岩、含砾砂岩、灰色和灰绿色泥岩为主的地层。沙一段发育了以灰色泥岩、砂岩和生物灰岩为主的沉积,这一时期沉积环境以浅湖和扇三角洲为主。东三段沉积中心转移到高柳断层的下降盘,北堡、老爷庙逆牵引背斜,南堡、老堡断裂构造带及蛤坨逆牵引背斜构造带发育。沉积了以砂泥岩为主的地层,最大厚

度超过1500 m,沉积环境主要是扇三角洲和湖泊体系^[6]。这导致烃源岩形成时的生源、沉积环境均存在一定的差别。

南堡凹陷总体上为陆相湖盆的沉积背景,导致东三段、沙一段和沙三段3套烃源岩的生物标志物分布特征具有一定的相似性,但母源输入和沉积环境的差异,使得它们在生物标志物组合特征上又有所不同。其中东三段烃源岩生物标志物特征为正构烷烃分布完整,碳数分布呈双峰型,姥植比大于1,几乎不含 β -胡萝卜素,规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}-C_{28}-C_{29}$ 分布型式均为“V”型, C_{27} 规则甾烷相对含量略高于 C_{29} 规则甾烷,孕甾烷和升孕甾烷含量很低,重排甾烷含量较高, T_s 相对于 T_m 丰度较低,伽马蜡烷含量很低(图1(a)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 为0.28~0.44, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 为0.26~0.53和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 为0.41~0.86;沙一段烃源岩生物标志物特征为正构烷烃分布完整,碳数近似呈正态型分布,姥植比大于1,几乎不含 β -胡萝卜素,规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}-C_{28}-C_{29}$ 分布型式均为“V”型, C_{27} 规则甾烷相对含量略高于 C_{29} 规则甾烷,孕甾烷和升孕甾烷含量较低,重排甾烷含量中等, T_s 与 T_m 含量接近,伽马蜡烷含量很低(图1(b)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 为0.28~0.50, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 为0.28~0.59和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 为0.54~0.61;沙三段烃源岩可分为两类:第一类正构烷烃分布完整,碳数分布呈双峰型,姥植比大于1,不含 β -胡萝卜素, $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 规则甾烷含量一般较高,大于或接近于 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 规则甾烷,表明以陆源高等植物生源为主,同时含有高丰度的 C_{30} 甲基甾烷,孕甾烷和升孕甾烷含量较高,重排甾烷含量中等, T_s 丰度高于 T_m ,伽马蜡烷含量很低(图1(c)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 为0.07~0.50, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 为0.23~0.52和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 为0.42~0.61,总体上都已成熟,拾场次凹沙三段烃源岩主要属于此类;第二类烃源岩与第一类的区别在于正构烷烃高碳数部分缺失,碳数分布呈单峰型,孕甾烷和升孕甾烷含量很高,重排甾烷含量也较高, C_{30} 甲基甾烷含量很低,伽马蜡烷和五环三萜烷的含量高于沙三段第一类烃源岩(图1(d)),主要分布于滩海区沙三段。



· Fig. 1 Mass chromatograms of some biomarkers of source rocks in Nanpu sag

2 原油生物标志物组合特征及成因类型划分

研究区不同油田原油的生物标志物组合特征存

在明显的差别,根据原油中生物标志物组合特征,将原油划分为6类,其中前3类原油分布在陆上柳赞、高尚堡、老爷庙和北堡油田,后3类原油分布在滩海研究区。各类原油的生物标志物组合特征为:(1)第I类原

油正构烷烃碳数分布极不完整,总离子流图上基线鼓包明显,含有较高的 β -胡萝卜素,具有不同程度的生物降解现象,且随着降解程度的增加, β -胡萝卜素相对含量也增加^[7],孕甾烷和升孕甾烷含量较高, T_s 含量与 T_m 相当, $w(T_s)/w(T_s+T_m)$ 为0.35~0.63, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 为0.87~1.30, C_{30} 甾烷含量中等,伽马蜡烷含量较低(图2(a)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 平均值分别为0.37,0.41,0.57,这类原油在柳赞、高尚堡和老爷庙油田的新近系馆陶组、明化镇组均有分布;(2)第II类原油正构烷烃碳数分布特征呈双峰后峰型,不含 β -胡萝卜素,孕甾烷和升孕甾烷含量较低, $w(T_s)/w(T_s+T_m)$ 为0.54~0.68, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 为0.98~1.67, C_{30} 甾烷含量很低,伽马蜡烷含量较低,伽马蜡烷指数为0.09~0.12(图2(b)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 平均值分别为0.38,0.46,0.58,这类原油主要分布于老爷庙、北堡油田东一段,高尚堡油田高柳断层以南的东一段和东三段;(3)第III类原油正构烷烃碳数分布特征呈单峰后峰型,不含 β -胡萝卜素,孕甾烷和升孕甾烷含量较高, $w(T_s)/w(T_s+T_m)$ 为0.46~0.57, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 为0.98~1.67,含有较高含量的 C_{30} 甾烷;伽马蜡烷指数为0.07~0.11(图2(c)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 平均值分别为0.39,0.42,0.58,这类原油主要分布在柳赞-柳南和高尚堡油田(高柳断层以北地区)的沙一段和沙三段;(4)第IV类原油正构烷烃碳数分布特征呈单峰后峰型,不含 β -胡萝卜素,孕甾烷和升孕甾烷含量较高, $w(T_s)/w(T_s+T_m)$ 为0.49~0.55, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 主要为0.87~1.06, C_{30} 甾烷含量很低,伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷指数为0.15~0.27(图2(d)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 平均值分别为0.35,0.41,0.57,这类原油在滩海区明化镇组、馆陶组和东营组均有分布;(5)第V类原油正构烷烃碳数分布特征呈单峰态前峰型,高碳数部分缺失,不含 β -胡萝卜素,孕甾烷和升孕甾烷含量一般, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 为0.91, C_{30} 甾烷含量很低,伽马蜡烷含量中等(图2(e)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+$

22R)平均值分别为0.42,0.36,0.58,这一类主要分布于滩海区奥陶系;(6)第VI类原油正构烷烃碳数分布特征呈正态型,不含 β -胡萝卜素,孕甾烷和升孕甾烷含量较高, T_s 相对含量明显大于 T_m , $w(T_s)/w(T_s+T_m)$ 为0.59~0.90, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$ 为0.95~1.76, C_{30} 甾烷含量很低, C_{20} , C_{21} , C_{23} 三环萜烷呈上升型分布,伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷指数为0.27~0.28(图2(f)), $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$, C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 C_{31} 升藿烷 $w(22S)/w(22S+22R)$ 平均值分别为0.47,0.54,0.53,这类原油也主要分布于滩海奥陶系。

3 油源对比分析

尽管来源于同一套烃源岩层(同一族群)的原油在二次运移过程及聚集成藏后,由于地质-地球化学条件的变化将发生一系列地球化学变化,如油藏内原油的生物降解和水解作用^[8,9],热蚀变作用^[10-11],流体-岩石相互作用和油气运移过程中的分馏作用^[11-12]等均可能导致原油的化学组成发生明显的变化。但原油中部分甾、萜烷系列生物标志物的分布是相对稳定的,轻度到中等程度的生物降解作用、运移效应和成熟度对它们无明显的影响,这些生物标志物参数主要受生源母质和沉积环境影响,如 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{27})/w(C_{29})$, $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 $w(C_{28})/w(C_{29})$, $w(\text{伽马蜡烷})/w(C_{30}\text{藿烷})$ 、孕甾烷与升孕甾烷相对含量和部分芳烃化合物指标^[13],这些参数可用于油源对比。

3.1 正构烷烃的特征对比

正构烷烃的组分和分布特征受母质类型、有机质演化程度等多种因素的影响,如果原油和烃源岩有亲缘关系,原油和烃源岩的正构烷烃分布特征具有相似性。第I类原油遭受了较严重的生物降解(图2(a)),因此其总离子流图(TIC)特征与其对应的烃源岩之间不存在对应关系,无法根据正构烷烃分布特征进行油源对比。在总离子流图中,第II类原油正构烷烃与东三段和沙一段烃源岩具有一定的相似性(图1(b)、图2(b));第III类原油与沙三段第一类烃源岩抽提物饱和和烃具有一定的相似性(图1(c),图2(c));第IV类原油与第II类原油相似,与东三段及沙一段烃源岩均具有较好的对比性(图2(d));第V、VI类原油可能与分布于滩海区的沙三段第二类烃源岩存在亲缘关系(图1(d),图2(e))。

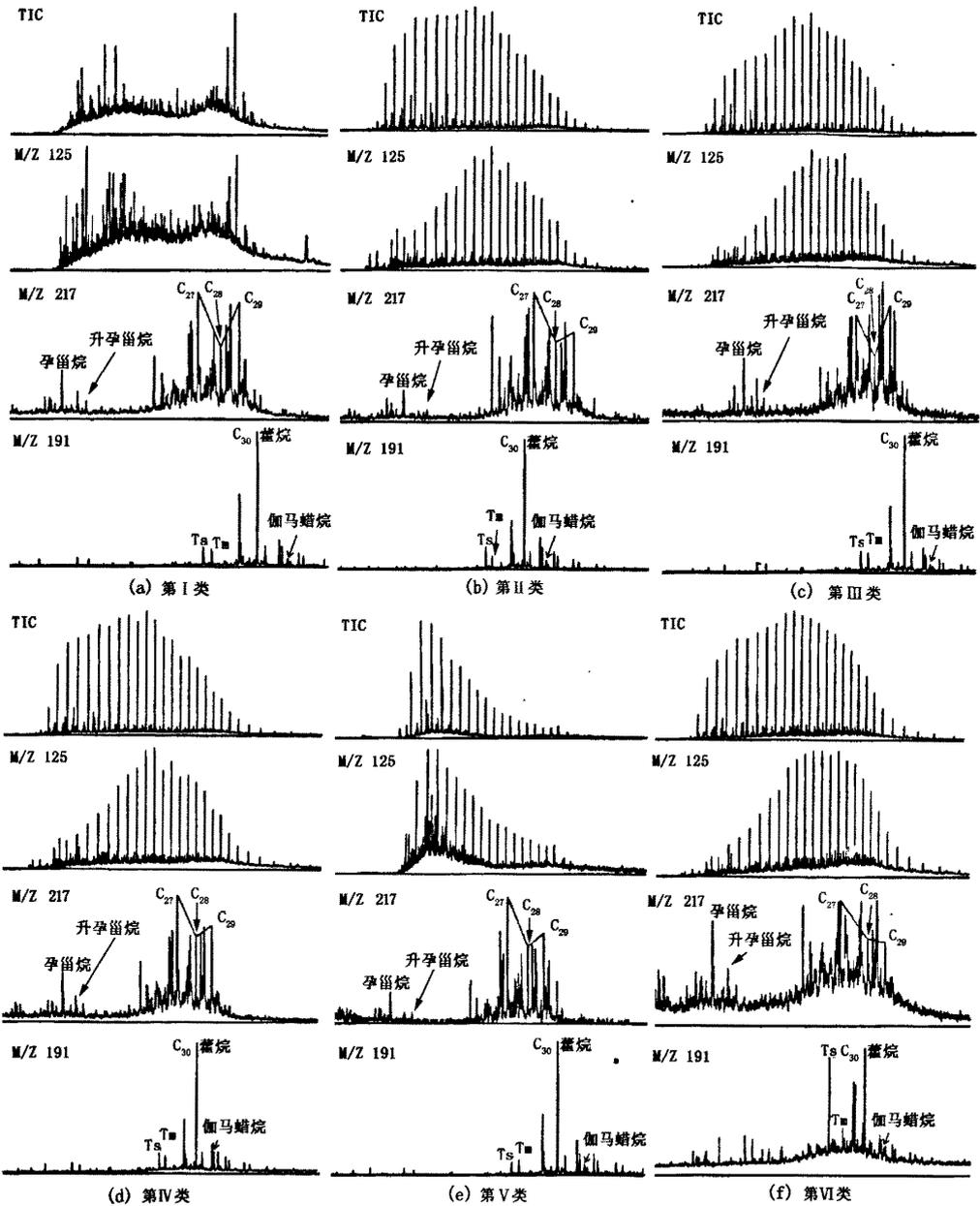


图2 南堡凹陷各类原油部分生物标志物色谱质谱图

Fig. 2 Mass chromatograms of some biomarkers of oils in Nanpu sag

3.2 甾萜类生物标志物组合特征对比

根据烃源岩与原油的甾萜烷生物标志物指纹特征分析,第I类原油中甾烷、五环三萜烷(图2(a))的指纹特征与东三段烃源岩(图1(a))的指纹特征十分相近;第II类原油中甾烷、五环三萜烷(图2(b))的指纹特征与沙一段烃源岩指纹特征(图1(b))的对比关系较好,第II类原油中的部分样品含有一定丰度的C₃₀甾烷,可能混有沙三段烃源岩生成

的油气;第III类原油中甾烷、五环三萜烷(图2(c))的指纹特征与沙三段第一类烃源岩指纹特征(图1(c))十分相近;第IV类原油中甾烷、五环三萜烷(图2(d))的指纹特征与沙一段烃源岩指纹特征(图1(b))有很好的对比关系;第V,VI类原油中甾烷、五环三萜烷(图2(e),(f))的指纹特征与沙三段第二类烃源岩(图1(d))有较好的可比性,第VI类原油Ts明显高于Tm可能是由于滩海区沙三段烃源岩成

熟度较高造成的,在滩海区也发现了 T_s 明显高于 T_m 的成熟度较高的烃源岩(图3)。

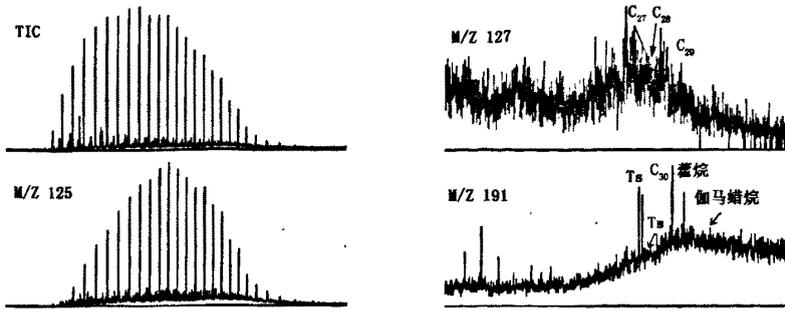


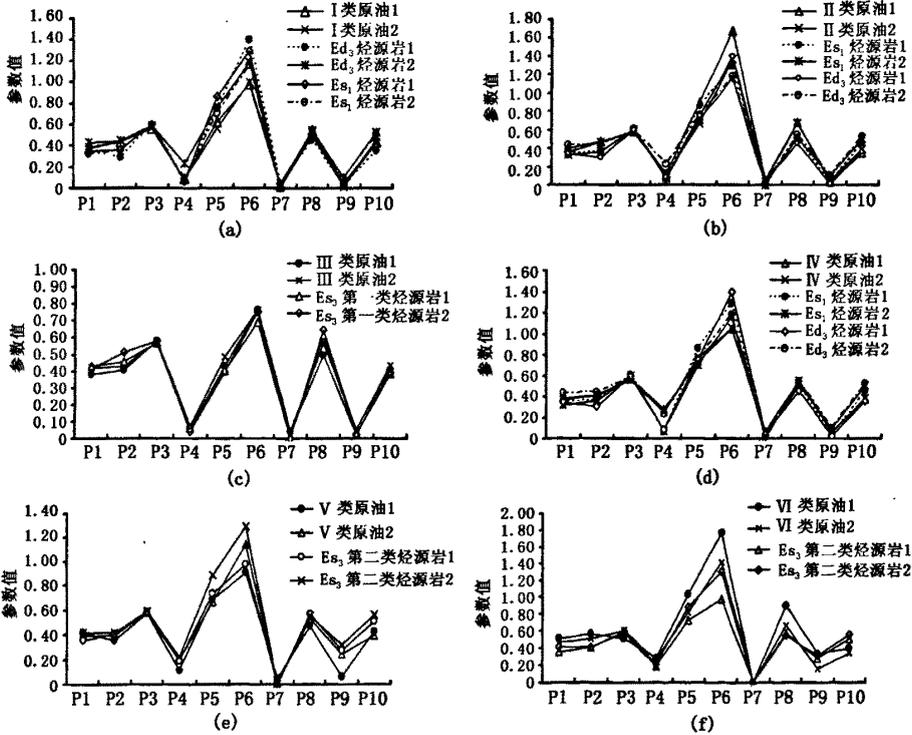
图3 北5井岩心抽提物饱和和烃色谱质谱图

Fig.3 Mass chromatograms of saturated hydrocarbon of oils extracted from the source rocks in well Bei 5

3.3 生标参数相关图对比

选择了反映成熟度、生源和沉积环境方面的多

项生物标志物参数,对南堡各类原油与不同层位烃源岩进行了对比研究,结果见图4。



P1— $\alpha\alpha C_{29}w(S)/w(S+R)$, P2— $C_{29}w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$, P3— $C_{31}w(S)/w(S+R)$, P4— $w(\text{伽马蜡烷})/w(C_{30}\text{藿烷})$, P5— $\alpha\alpha\alpha 20Rw(C_{28})/w(C_{29})$, P6— $\alpha\alpha\alpha 20Rw(C_{27})/w(C_{29})$, P7—升藿烷指数, P8— $w(T_s)/w(T_s+T_m)$, P9— $(C_{19}+C_{20})w(\text{三环藿烷})/w(\text{藿烷})$, P10— $(\text{藿烷}+\text{莫烷})w(C_{29})/w(C_{30})$

图4 南堡凹陷原油及烃源岩生物标志物参数指纹对比

Fig.4 Comparison of biomarker index fingerprints from oil and source rocks in Nanpu sag

(1) I类原油、II类原油和滩海区的IV类原油的生物标志物特征比较相近,与东三段和沙一段烃源岩有较好的可比性(图4(a),(b),(d)),推测这3类原油主要为东三段和沙一段的混源油。

(2) III类原油的生物标志物特征与沙三段第一类烃源岩很接近(图4(c)),表明高柳构造沙三段原油主要来自拾场次凹沙三段烃源岩。

(3) 滩海地区的V、VI类原油生物标志物特征

与沙三段第二类烃源岩的较接近(图4(e),(f)),表明滩海区的奥陶系原油主要源于滩海区沙三段烃源岩。

4 结 论

(1)东三段、沙一段和沙三段3套烃源岩的生物标志物分布特征具有一定的相似性,但由于母源输入和沉积环境的差异,使得它们在生物标志物组成特征上又有所不同。东三段和沙一段烃源岩生物标志物特征总体上相似,与沙三段烃源岩有明显差别。沙三段烃源岩含有较高丰度的孕甾烷和升孕甾烷, T_s 相对于 T_m 丰度也较高,此外沙三段第一类烃源岩含有高丰度的 C_{30} 甲基甾烷,而第二类烃源岩的伽马蜡烷和五环三萜烷含量则较高。

(2)不同油田原油的生物标志物组合特征存在明显的差别,根据原油中生物标志物组合特征,将原油划分为6类,其中I, II, III类为陆上原油,IV, V, VI类为滩海区原油。

(3)高柳构造带高柳断层以北地区的原油主要来自沙三段烃源岩,断层以南的原油主要来源于东三段和沙一段烃源岩,部分混有沙三段烃源岩生成的油气;老爷庙和北堡构造的原油主要来源于东三段和沙一段烃源岩,可能混有沙三段产生的油气;滩海区东营组原油主要来自于东三段和沙一段烃源岩,奥陶系原油主要来源于沙三段。

参考文献:

[1] 卢鸿,王铁冠,徐新德,等. 南堡凹陷原油的有机地球化学特征[J]. 江汉石油学院学报,1998,20(3):28-35.
 LU Hong, WANG Tie-guan, XU Xin-de. Organic geochemical characteristics of crude oils in Nanpu Sag[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1998,20(3):28-35.

[2] 谭丽娟,田世澄. 南堡凹陷油气运移特征及成藏动力学系统划分[J]. 石油勘探与开发,2000,27(5):16-18.
 TAN Li-juan, TIAN Shi-cheng. Characteristics of hydrocarbon migration and kinetic system classification of pool-forming in Nanpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(5):16-18.

[3] 刘蕴华,周海民,熊保贤,等. 南堡凹陷的含油气系统

分析[J]. 石油与天然气地质,2000,21(4):364-365.
 LIU Yun-hua, ZHOU Hai-min, XIONG Bao-xian, et al. Analysis of petroleum system in Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000,21(4):364-365.

[4] 贾齐山,李胜利,马乾,等. 冀东油田南堡凹陷南堡2号构造带烃源岩地球化学特征与油源对比[J]. 地质力学学报,2006,12(4):469-475.
 JIA Qi-shan, LI Sheng-li, MA Qian, et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the no. 2 structural belt of the Nanpu Subbasin, Eastern Hebei Oilfield, and source rock correlation[J]. Journal of Geomechanics, 2006,12(4):469-475.

[5] 程克明. 吐哈盆地油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1994.

[6] 周海民,董月霞,刘蕴华,等. 断陷盆地油气勘探理论与实践[M]. 东营:石油大学出版社,2001:22-24.

[7] 宋长玉. 济阳拗陷严重生物降解油的类型与形成途径[J]. 油气地质与采收率,2006,4(13):15-17.
 SONG Chang-yu. Type and formation way of severe biodegradation oil in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006,4(13):15-17.

[8] CONNAN J. Biodegradation of crude oils in reservoirs [C]//BROOKS J, WELTE D. Advances in Petroleum Geochemistry. London: London Academic Press, 1984: 299-335.

[9] PALMER S E. Effect of biodegradation and water washing on crude oil composition [C]//ENGEL M H, MACKO S A. Organic Geochemistry. New York: Plenum Press, 1993:511-533.

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

[11] HWANG R J, MOLDOVAN J M. Oil composition variation and reservoir continuity: unity field, Sudan [J]. Org Geochemistry, 1994, 21: 171-188.

[12] MILLES J A. Secondary migration routes in the Brent sandstones of the Viking Granben and East Shetland basin; evidence from oil residues and subsurface pressure data [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1718-1735.

[13] PETERS K E, MOLDOVAN J M. The biomarker guide: interpreting molecule FOSSILS in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993.

(编辑 刘为清)