

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

王 权¹,王道军²,邹华耀^{2*},郭柳汐¹,杨 帆²,殷 杰²,贾小军²,芦晓伟²

(1. 中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院,河北 任丘 062552;

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249)

摘要:综合利用地球化学、测井、地震等资料研究霸县凹陷烃源岩的生烃潜力、有机质类型、母质来源及沉积保存条件。根据烃源岩与原油的生物标志化合物参数特征进行油源对比,厘清各套烃源岩对油气成藏的贡献。研究结果表明,霸县凹陷发育沙四段、沙三段下亚段及中亚段、沙一段下亚段4套烃源岩,具有生排烃潜力大、有机质类型好的特点,且均已进入生烃门限。其中,沙四段和沙三段下亚段、中亚段烃源岩分布较广,沙一段下亚段烃源岩仅分布于研究区南部地区。生物标志化合物参数分析结果揭示,研究区4套烃源岩的有机质输入与沉积保存条件存在差异,沙四段和沙三段下亚段有机质供应相对于沙三段中亚段和沙一段下亚段充足,但是沉积保存条件却相对较差。通过油源对比发现,霸县凹陷的原油可以分为3类单源油及2类混源油,沙三段下亚段和中亚段烃源岩是现今已发现油藏的主力贡献烃源岩,沙四段烃源岩的有机质丰度较高、生烃潜力大,但已发现以沙四段烃源岩提供油源的油藏多呈近源零星分布于深层及潜山,表明霸县凹陷以沙四段烃源岩为油源的深层及潜山油藏应具有较大的勘探潜力。

关键词: 烃源岩 生物标志化合物 油源对比 成藏贡献 霸县凹陷

中图分类号: TE112.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)06-0017-08

Development characteristics of biomarkers in Paleogene source rocks and its significance to petroleum accumulation in the Baxian Sag

Wang Quan¹, Wang Daojun², Zou Huayao², Guo Liuxi¹, Yang Fan², Yin Jie², Jia Xiaojun², Lu Xiaowei²

(1. Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Through analyses of TOC, Rock-Eval, biomarker compositions and drill and seismic data, this study was undertaken to investigate the hydrocarbon generation potential, organic matter types, organic matter input and sedimentary and preservation environment of source rocks in the Baxian Sag. Based on source-related biomarker parameters of the source rocks and oil, a detailed oil-source correlation was conducted to identify the origin of oil and to evaluate hydrocarbon contributions of each set of source rocks. The result shows that there are four sets of high-quality source rocks developed respectively in the fourth member of Shahejie Formation (E_{2s4}), the lower third member of Shahejie Formation (E_{2s3}^L), the middle third member of Shahejie Formation (E_{2s3}^M) and the lower first member of Shahejie Formation (E_{3s1}^L), among which hydrocarbon source rocks in E_{2s4} , E_{2s3}^L and E_{2s3}^M are distributed widely and the source rocks in E_{3s1}^L are only distributed in the southern of the studied area. And these source rocks are characterized of good type of organic matter and great potential for hy-

收稿日期: 2017-07-11。

作者简介: 王权(1970—),男,河北冀州人,高级工程师,博士,从事油气勘探综合研究工作。联系电话: 13785819102, E-mail: 1365476846@qq.com。

*通讯作者: 邹华耀(1963—),男,江西上高人,教授,博导。联系电话: 13911790264, E-mail: huayaozou@cup.edu.cn。

基金项目: 中国石油华北油田分公司科技项目“饶阳—霸县凹陷环境-生物协同演化与优质烃源岩发育分布及其成藏贡献研究”(HBYT-YJY-2014-JS)。

drocarbon generation and expulsion. The four sets of hydrocarbon source rocks have entered into hydrocarbon generation threshold and are thermally mature. The characteristics of biomarker parameters reveal that the original input and sedimentary preservation environments of organic matter are different. The source rocks in E_{2s4} and E_{2s3}^L have more abundant organic matter supply than those in E_{2s3}^M and E_{3s1}^L , however, sedimentary preservation conditions at the stages of E_{2s3}^M and E_{3s1}^L are relatively poor. From the oil-source correlation, three oil families were derived from the source rocks in E_{2s4} , E_{2s3}^L and E_{3s1}^L respectively, and two types of mixed oil were identified. By analysis of hydrocarbon generation potential of the source rocks, their spatial distribution and distribution of their related traps, it is concluded that the main hydrocarbon source rocks for traps that have found are developed in E_{2s3}^{M-L} . The source rocks in E_{2s4} have high quality and great potential for hydrocarbon generation and expulsion. E_{2s4} -derived oils migrated for a short distance and dispersedly accumulated in the deep or buried-hill traps near the kitchen, but only a few of them have been found. Such a petroleum distribution pattern has important implications for future exploration. There is considerable exploration potential for E_{2s4} -derived oils in the deep traps and buried-hill traps in the Baxian Sag.

Key words: source rocks; biomarkers; oil-source correlation; contributions to petroleum accumulation; Baxian Sag

油气成藏往往受烃源岩分布的控制,特别是优质烃源岩的分布。优质烃源岩具有有机质丰度高、类型好、生烃潜力大等特点,准确地刻画优质烃源岩的发育及分布特征对油气勘探具有重要作用^[1-4]。霸县凹陷是冀中拗陷重要的富油凹陷,勘探面积为2 400 km²,已探明石油地质储量为 1.8×10^8 t,天然气地质储量为 139×10^8 t。前人对霸县凹陷进行了大量研究,发现其主要发育沙四段、沙三段和沙一段烃源岩,油气来源特别复杂^[5-9]。为此,在盆地沉积演化的背景下,研究烃源岩发育层段的生烃潜力、有机质类型及其有机质来源与沉积保存条件,分析烃源岩的地球化学特征,并通过油源对比,明确各套烃源岩对油气成藏的贡献,揭示霸县凹陷的油气分布规律及勘探方向,以期为进一步冀中拗陷富油凹陷及盆地尺度的油气分布规律研究提供参考。

1 区域地质概况

冀中拗陷位于渤海湾盆地的西北部,为典型的半地堑群,面积约为 3.2×10^4 km²,发育12个凹陷以及6个凸起^[10-11]。霸县凹陷位于冀中拗陷中北部,为受牛东断层控制的西断东超、西深东浅的继承性断陷凹陷;其西邻牛驼镇凸起,北部与廊固凹陷、武清凹陷相隔,向东过渡为大城凸起,南部以徐水—安新横向调节带为界与饶阳凹陷相隔。霸县凹陷内部可以划分为霸县洼槽、文安斜坡、岔河集—高家堡断裂背斜构造带、白洋淀潜山构造带及郑州断裂潜山构造带共5个重点构造带(图1)。

霸县凹陷为新生代断陷凹陷,其古近系自下而上发育孔店组、沙河街组以及东营组(图2)。研究区古近纪的湖盆沉积经历了5个沉积演化阶

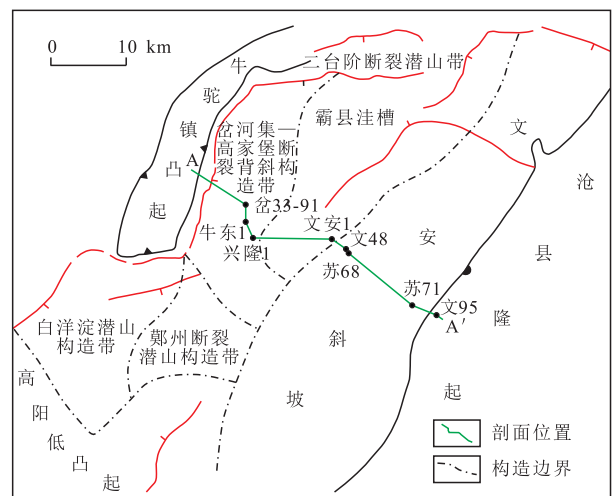


图1 霸县凹陷区域构造划分

Fig.1 Structural division in the Baxian Sag

段:孔店组(E_{2k})—沙四段(E_{2s4})沉积时期为断陷分割充填期,沙三段下亚段(E_{2s3}^F)—中亚段(E_{2s3}^M)沉积时期为断陷扩张深陷期,沙三段上亚段(E_{2s3}^L)—沙二段(E_{2s2})沉积时期为断陷萎缩期,沙一段下亚段(E_{3s1}^F)沉积时期为断陷扩展期,沙一段上亚段(E_{3s1}^L)—东营组(E_{3d})沉积时期为断拗抬升消亡期^[12]。古气候也经历了干旱炎热(孔店组—沙四段沉积时期)—温暖湿润(沙三段沉积时期)—干旱炎热(沙二段沉积时期)—温暖湿润(沙一段—东营组沉积时期)的干湿交替^[13]。

在不同的构造-气候背景下,研究区发育多套湖相烃源岩,其中沙四段沉积时期冀中拗陷各湖盆之间的连通性较差,在霸县凹陷沉积中心发育半深湖—深湖、浅湖沉积;沙三段下亚段—中亚段沉积时期,研究区湖盆广、水体深,发育大套暗色泥岩沉积,为烃源岩重要的建设期;沙一段下亚段沉积时期水体相对沙三段沉积时期浅,在霸县凹陷南部以浅湖、半深湖沉积为主。

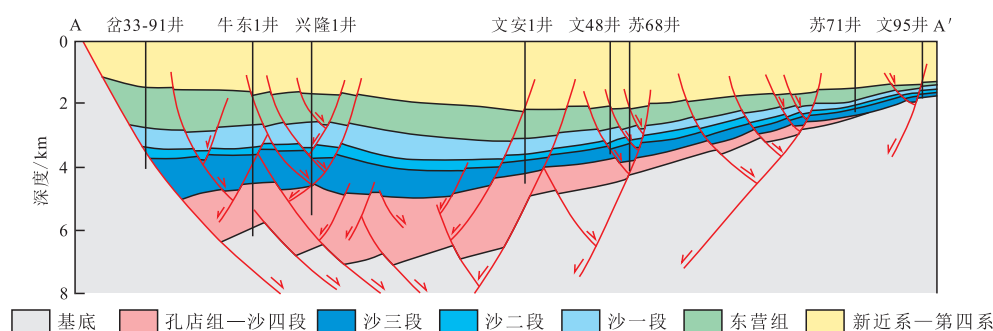


图2 霸县凹陷典型沉积剖面

Fig.2 A typical profile in the Baxian Sag

2 烃源岩生烃潜力

优质烃源岩对油气聚集具有巨大的贡献^[1-4],许多学者对优质烃源岩已有深入研究,但评价标准却存在差异^[14-16]。综合霸县凹陷的石油地质特征,以有机碳含量大于2%作为优质烃源岩的评价标准,选取位于霸县凹陷及部分斜坡地区共计349块钻井岩心及岩屑烃源岩样品,粉碎、清洗处理后,进行总有机碳含量及岩石热解实验测试,其中沙四段、沙三段下亚段及中亚段、沙一段下亚段烃源岩样品的数量分别为126,82,71和70块。

实验结果(图3)表明,研究区沙四段烃源岩样品的总有机碳含量为0.08%~11.3%,平均为1.65%,其中29%样品的总有机碳含量大于2%,为优质烃源岩;生烃潜量为0.14~241 mg/g,平均为10.1 mg/g,46%样品的生烃潜量大于4 mg/g。沙三段下亚段烃源岩样品的总有机碳含量为0.3%~20.47%,平均为2.91%,67%样品的总有机碳含量大于2%,为优质烃源岩;生烃潜量为2.27~31.16 mg/g,

平均为9.86 mg/g,79%样品的生烃潜量大于4mg/g。沙三段中亚段烃源岩样品的总有机碳含量为0.23%~11.1%,平均为2.44%,43%样品的总有机碳含量大于2%,为优质烃源岩;生烃潜量为0.16~48.17 mg/g,平均为10.19 mg/g,75%样品的生烃潜量大于4 mg/g。沙一段下亚段烃源岩样品的总有机碳含量为0.09%~2.36%,平均为0.94%,10%样品的总有机碳含量大于2%,为优质烃源岩;生烃潜量为0.07~18.12 mg/g,平均为4.59 mg/g,38.5%样品的生烃潜量大于4 mg/g。霸县凹陷4套烃源岩样品总有机碳含量与生烃潜量的关系(图3)表明,二者具有良好的正相关关系。

烃源岩的氢指数与最高热解峰温关系的分析结果表明,研究区沙四段烃源岩以Ⅱ₂型干酪根为主,含少量Ⅱ₁型干酪根;沙三段下亚段烃源岩以Ⅱ₁型干酪根为主,含少量Ⅰ和Ⅱ₂型干酪根;沙三段中亚段烃源岩以Ⅱ₁型干酪根为主,含少量Ⅰ和Ⅱ₂型干酪根;沙一段下亚段烃源岩有机质类型丰富,包括Ⅰ,Ⅱ₁和Ⅱ₂型干酪根。

研究区沙三段中、下亚段优质烃源岩最为发育,其次为沙四段,沙一段下亚段优质烃源岩发育相对较少,大部分为中等一差烃源岩。以沙三段中、下亚段烃源岩的有机质类型最好,沙四段烃源岩的有机质类型较好,沙一段下亚段烃源岩的有机质类型较丰富,表明其有机质为多元化输入。烃源岩有机质的热演化程度可以反映有机质的实际生烃能力,只有达到一定热演化阶段才可以成为有效的烃源岩^[17-18],研究区4套烃源岩总体均已达到成熟演化阶段^[5-7]。

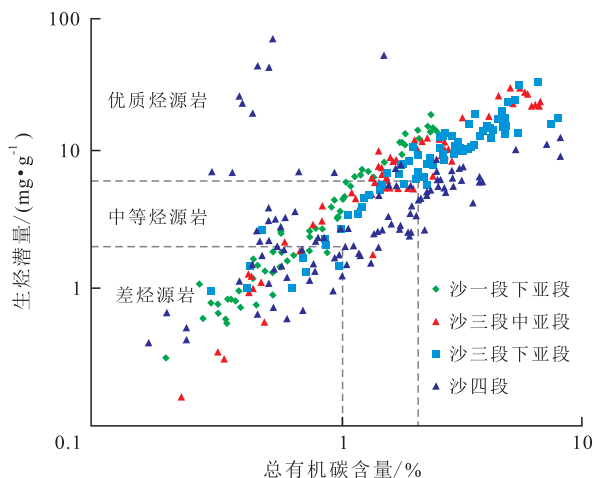


图3 霸县凹陷烃源岩总有机碳含量与生烃潜量关系

Fig.3 Relationship between TOC and S₁+S₂ of source rocks in the Baxian Sag

3 烃源岩生物标志化合物特征

对研究区39块烃源岩样品进行饱和烃色谱质谱分析。选取姥植比(Pr/Ph)、伽马蜡烷指数(G/H)、

重排甾烷指数($C_{27}Dia/C_{27}ST$)、4-甲基甾烷指数(4-MSI)、 C_{19} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷(C_{19}/C_{23})、 C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷(C_{24}/C_{26})及甾烷/藿烷(S/H)生物标志化合物参数对研究区烃源岩发育层段的沉积保存条件、有机质来源进行分析^[19-20]。利用生物标志化合物参数对比分析油源常需考虑热成熟度的影响。陈建渝等发现,渤海湾盆地4-MSI及G/H受热演化的影响较小^[21-22]。郝芳等在研究渤海海域(指现今渤海湾盆地的海域部分)沙垒田凸起油气来源时也发现, C_{19}/C_{23} 、 C_{24}/C_{26} 、 $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 、S/H、G/H和4-MSI与烃源岩成熟度参数的相关性较弱^[23-24],表明这些参数受烃源岩成熟度影响较小,在渤海湾地区主要反映有机质来源与沉积环境特征。

Pr/Ph 高值往往指示氧化环境,Pr/Ph 低值反映还原环境^[25]。伽马蜡烷往往出现于高盐度沉积环境,与水体分层有关,G/H 值越低说明水体为淡水,越高说明水体盐度较高,高盐度的水体往往导致水体分层形成还原环境。Moldowan 等认为在酸性和氧化条件下利于重排甾烷的形成,因此可以利用 $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值表示水体的氧化—还原性, $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值越低代表还原性越强^[26]。4-MSI 值常反映低等水生生物藻类的发育程度,如渤海藻、副渤海藻的发育情况^[24-28]。萜烷参数可以表征高等陆源有机质输入程度, C_{19}/C_{23} 和 C_{24}/C_{26} 值越高,反映高等陆源有机质输入贡献越大^[29-30]。S/H 值反映真核生物

(主要是藻类和高等植物)与原核生物(细菌)的相对贡献。

霸县凹陷 39 块烃源岩样品 Pr/Ph, G/H, $C_{27}Dia/C_{27}ST$, 4-MSI, C_{19}/C_{23} , C_{24}/C_{26} 及 S/H 生物标志化合物的分析结果(图 4)表明,其沙四段烃源岩 Pr/Ph 值中等,为 1.1~2.0,指示还原环境;G/H 值较低,为 0.06~0.13; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值偏小,但是在 4 套烃源岩中最高,反映为弱还原环境; C_{19}/C_{23} 及 C_{24}/C_{26} 值分别为 0.55~0.76 和 0.71~1.07,表明高等陆源有机质贡献较大;4-MSI 值最高,表明藻类等低等水生生物最为发育;S/H 值相对偏低,为 0.19~0.36,可能与陆源有机质输入后遭受一定程度的细菌改造有关。4-MSI 值较高是研究区沙四段烃源岩的特点,有机质来源主要为渤海藻和副渤海藻等藻类低等水生生物并有大量高等陆源有机质贡献,沉积环境为弱还原—还原环境。

研究区沙三段下亚段烃源岩 Pr/Ph 值相比沙四段偏大,反映为弱还原环境;G/H 值为 0.03~0.28,水体盐度较低,趋于淡水,为微咸水沉积; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值为 0.15~0.45,指示为还原环境; C_{19}/C_{23} 及 C_{24}/C_{26} 值分别为 0.2~0.5 和 0.6~1.44; 4-MSI 值较低,为 0.1~0.2,表明有部分藻类发育;S/H 值较低,主要为 0.10~0.20,与沙四段烃源岩相似,可能与高等陆源有机质受细菌的改造有关。研究区沙三段下亚段高等陆源有机质输入较多,藻类等低等水生生物相

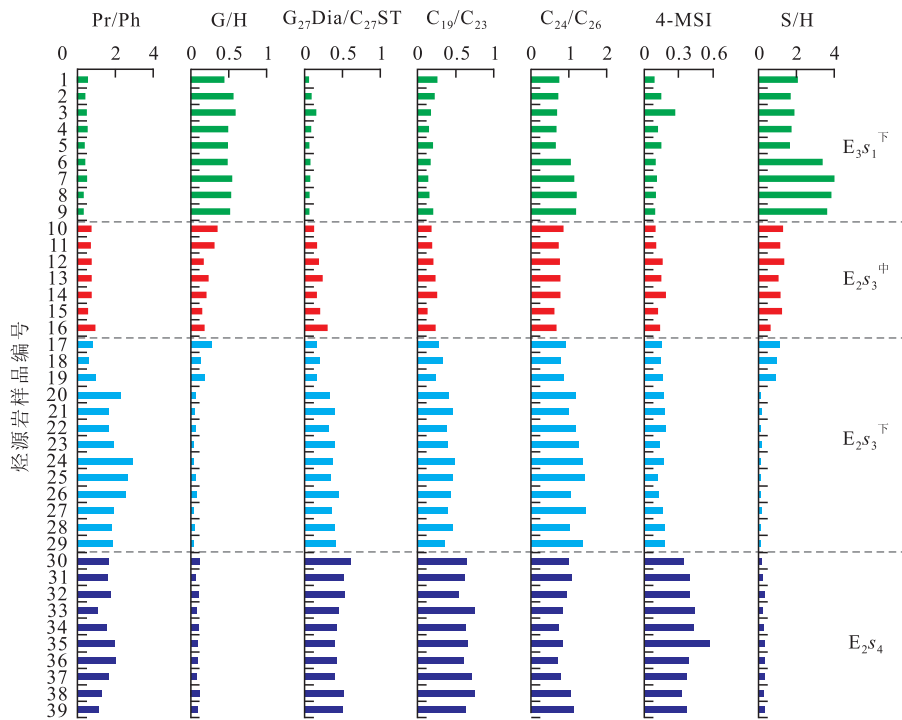


图4 霸县凹陷反映有机质输入及沉积保存条件的主要生物标志化合物组成及特征

Fig.4 Composition and characteristics of the main biomarkers reflecting organic matter input and depositional environment in the Baxian Sag

对沙四段发育较少,沉积水体为淡水弱还原—还原环境,盐度分层较弱。

研究区沙三段中亚段烃源岩 Pr/Ph 值较小,为 0.5~1.0,表明为强还原环境;G/H 值中等,为 0.15~0.35,反映盐度相对较高,为半咸水沉积,水体底部存在盐度分层现象; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值为 0.12~0.30,表明为还原环境,且其还原性强于沙三段下亚段; C_{19}/C_{23} 和 C_{24}/C_{26} 值分别为 0.13~0.28 和 0.5~0.82,反映高等陆源有机质输入比沙三段下亚段有所减少;4-MSI 值较低,为 0.1~0.2,反映有藻类发育;S/H 值相对偏高,为 0.62~1.35,反映藻类及陆源有机质输入较多。研究区沙三段中亚段藻类等低等水生生物输入中等,高等陆源有机质输入中等,为淡水—半咸水存在相对弱分层现象的强还原环境。

研究区沙一段下亚段烃源岩 Pr/Ph 值最小,为 0.2~0.6,指示强还原环境;G/H 值最大,为 0.42~0.6,反映沉积水体盐度较高,存在盐度分层; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值较低,为 0.06~0.15,为强还原环境,与 Pr/Ph 值反映结果一致; C_{19}/C_{23} 和 C_{24}/C_{26} 值分别为 0.18~

0.35 和 0.52~1.2,反映高等植物有机质贡献水平较低;4-MSI 值较低,为 0.1~0.3,反映藻类发育较少;S/H 值较高,为 1.65~2.06,反映藻类和高等陆源有机质为主的真核生物有机质贡献比以细菌为主的原核生物贡献大。研究区沙一段下亚段高等植物有机质贡献较少,且渤海藻及副渤海藻发育较少,为高盐度、强还原沉积环境;虽然沙一段下亚段沉积时期具良好有机质保存条件,但其有机质贡献相对较少,导致沙一段下亚段优质烃源岩发育较少。

4 烃源岩对油气成藏的贡献

4.1 油源对比分析

基于 6 类生物标志化合物参数 (G/H, 4-MSI, $C_{27}Dia/C_{27}ST$, S/H, C_{19}/C_{23} 及 C_{24}/C_{26}) 对霸县凹陷 72 份原油样品进行聚类统计并划分油族。结果(图 5)表明,研究区大致可以分为 5 类原油,包含 3 类单源油 (A 类、B 类、C 类) 和 2 类混源油 (D 类、E 类)。

A 类原油 G/H 值较高,为 0.41~0.51,平均为

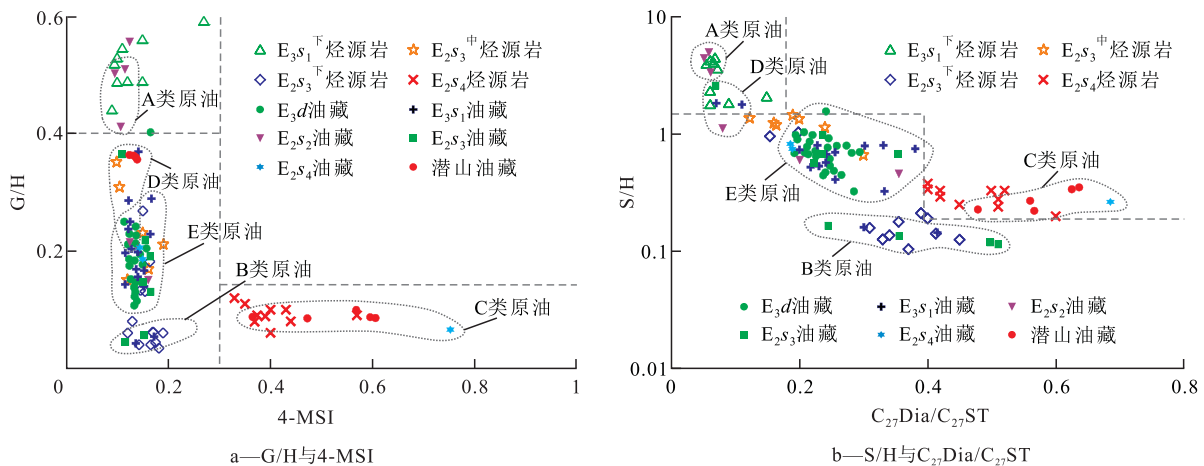


图5 霸县凹陷生物标志化合物参数交会图

Fig.5 Crossplots of biomarker parameters in the Baxian Sag

0.48; 4-MSI 值偏低,为 0.09~0.11,平均为 0.10; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值较低,为 0.05~0.06,平均为 0.059; S/H 值较高,为 3.02~4.43,平均为 3.85。A 类原油生物标志化合物参数特点与沙一段下亚段烃源岩特征较为相似(图 4)。

B 类原油 G/H 值较低,为 0.04~0.07,平均为 0.05; 4-MSI 值偏低,为 0.12~0.23,平均为 0.16; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值中等偏高,为 0.24~0.51,平均为 0.39; S/H 值较低,为 0.11~0.16,平均为 0.13。B 类原油生物标志化合物参数特点与沙三段下亚段烃源岩特征较为相似。

C 类原油 G/H 值较低,为 0.07~0.10,平均为

0.08; 4-MSI 值最高,为 0.37~0.75,平均为 0.56; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值偏高,为 0.48~0.68,平均为 0.59; S/H 值较低,为 0.17~0.32,平均为 0.26。该类原油生物标志化合物参数特点与沙四段烃源岩特征较为相似。

D 类原油 G/H 值中等—高,为 0.21~0.36,平均为 0.33; 4-MSI 值偏低—中等,为 0.11~0.14,平均为 0.12; $C_{27}Dia/C_{27}ST$ 值较低,为 0.07~0.11,平均为 0.09; S/H 值较高,为 1.03~2.32,平均为 1.70。从原油特征来看,D 类原油为混源原油,其生物标志化合物参数特点与沙三段中、下亚段及沙一段下亚段烃源岩特征较为相似。

E类原油G/H值中等—偏低,为0.11~0.57,平均为0.20;4-MSI值偏低—中等,为0.12~0.16,平均为0.13;C₂₇Dia/C₂₇ST值中等,为0.19~0.38,平均为0.25;S/H值中等,为0.30~1.38,平均为0.66。从原油特征来看,E类原油生物标志化合物参数特点与沙三段下亚段和中亚段烃源岩特征较为相似。

4.2 烃源岩与油藏分布的关系

综合烃源岩的地球化学、测井识别及地震资料等数据^[31-33],统计实测及测井烃源岩评价总有机碳含量大于2.0%、热解生烃潜量大于6 mg/g、分布较广且连续、稳定烃源岩的厚度,结合有利岩性序列组合、地球物理分析等资料,研究霸县凹陷优质烃源岩的平面展布。结果表明,研究区沙四段优质烃源岩主要发育于霸县洼槽,最大厚度为90 m;沙三段下亚段优质烃源岩主要发育于霸县洼槽及高家堡南部地区,最大厚度为100 m;沙三段中亚段优质烃源岩主要发育于霸县洼槽及南部郭家庄以北地区,最大厚度为90 m;沙一段下亚段优质烃源岩主要发育于岔河集—文安以南地区,主要分布在南部郑州地区,最大厚度为45 m(图6)。

新近纪霸县凹陷的构造活动形成了一系列的

断裂输导体系,且在文安斜坡及凹陷边缘发育一系列的输导砂体,均对油气的输导及储存具有一定的控制作用^[34-35]。从油源对比结果来看,研究区沙四段烃源岩主要对C类原油提供油源,且油藏距离烃源岩分布区较近。沙三段下亚段烃源岩主要对B类、D类以及E类原油提供油源,油藏主要分布于岔河集—高家堡断裂背斜构造带沙河街组—东营组、文安斜坡沙河街组—东营组以及南部郑州断裂潜山构造带的浅层及部分潜山储层。沙三段中亚段烃源岩主要对D类及E类原油提供油源,油藏主要分布区及层段与沙三段下亚段烃源岩提供油源的油藏相似,但缺少对B类原油的贡献。沙一段下亚段烃源岩主要对A类及D类原油提供油源,油藏主要分布于文安斜坡南部、岔河集—高家堡断裂背斜构造带南部沙河街组及东营组,以及郑州断裂潜山构造带的浅层(图6)。

从烃源岩的生烃潜力、分布及不同层段烃源岩对油藏的贡献来看,霸县凹陷发育的油藏多呈近源分布,目前发现的油藏主要来自沙三段中、下亚段烃源岩的贡献,沙四段及沙一段下亚段烃源岩的贡献相对较少。研究结果表明,研究区以沙四段烃源

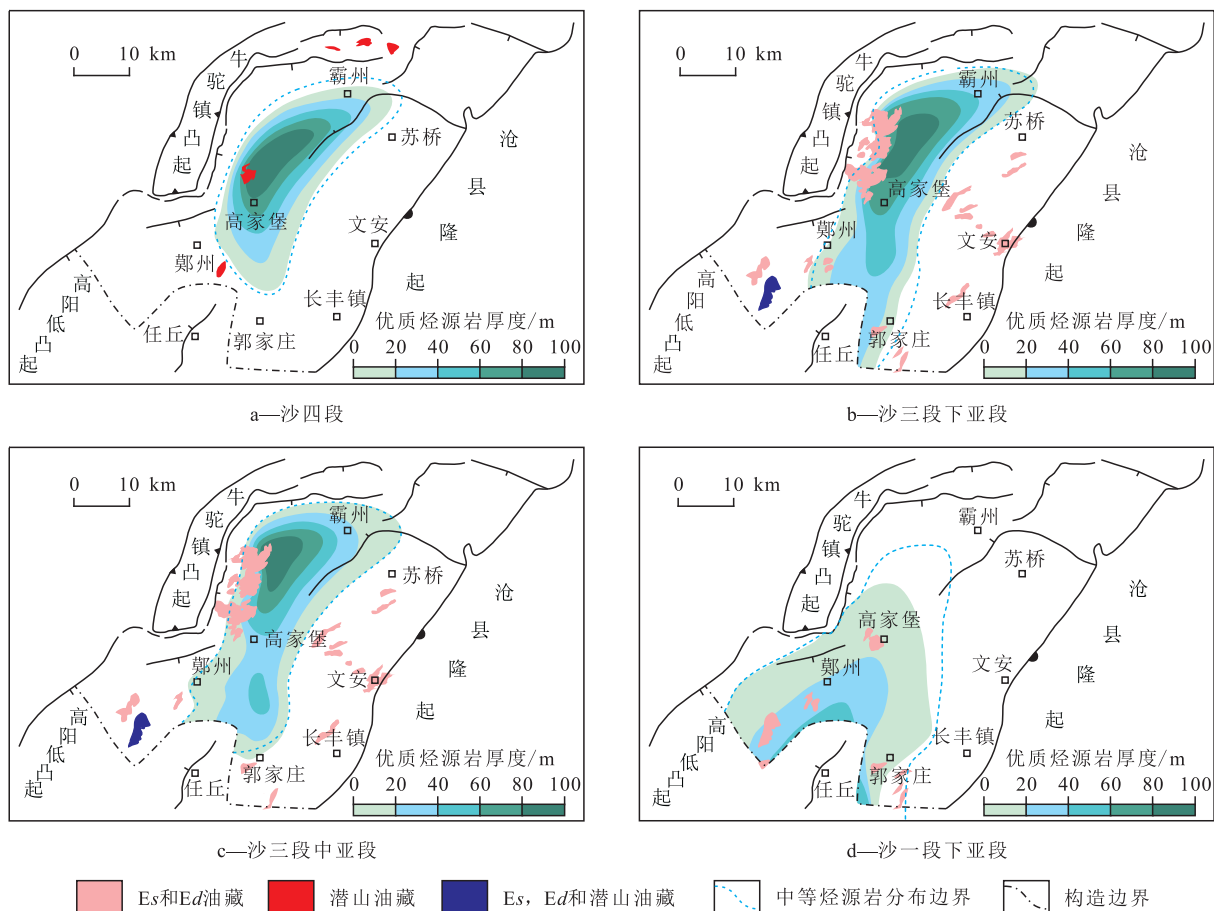


图6 霸县凹陷烃源岩与油藏分布特征

Fig.6 Distribution of the source rocks and their related oil traps in the Baxian Sag

岩提供油源的油藏多分布于近源的深层及潜山储层;沙四段烃源岩的有机质丰度高、类型较好,优质烃源岩分布范围广、厚度大,生油潜力大,因此沙四段烃源岩产生的油气具有很大的勘探前景,下步应将研究区深层及潜山储层作为重点勘探目标。

5 结论

霸县凹陷古近系主要发育沙四段、沙三段下亚段及中亚段、沙一段下亚段4套烃源岩,其中沙三段中、下亚段烃源岩最为发育,其次为沙四段烃源岩,沙一段烃源岩发育相对较少。研究区沙四段沉积时期为弱还原—还原沉积环境,藻类等低等水生植物及高等陆源有机质输入均较为丰富;沙三段下亚段沉积时期为弱还原—还原环境,陆源高等有机质输入较多,藻类等低等水生植物较发育;沙三段中亚段沉积时期为强还原沉积环境,藻类等低等水生植物及高等陆源有机质均有贡献;沙一段下亚段沉积时期为强还原环境,藻类等低等水生植物及高等陆源有机质输入有限。油源对比结果显示,霸县凹陷原油主要分为3类单源油和2类混源油。其油藏分布呈近源分布的特点,沙三段中、下亚段烃源岩是目前已发现油藏的主力油源贡献层段,由于沙四段烃源岩生烃潜力大、分布广,因此研究区以沙四段烃源岩为油源的油藏应具较好的油气勘探潜力。

参考文献:

- [1] 李敬生. 贝尔凹陷优质烃源岩的发现及其地质意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 326-332.
Li Jingsheng. Discovery and geological significance of high-quality source rock in Bei'er sag of Hailaer Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(3): 326-332.
- [2] 何锋, 靳广兴, 魏丽红. 东濮凹陷优质烃源岩研究意义[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 185-188.
He Feng, Jin Guangxing, Wei Lihong. Study significance of high-quality source rocks in Dongpu depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4): 185-188.
- [3] 任拥军, 杜雨佳, 郭潇潇, 等. 渤中凹陷古近系优质烃源岩特征及分布[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 5-13.
Ren Yongjun, Du Yujia, Guo Xiaoxiao, et al. Characteristics and distribution of Paleogene high-quality source rocks in Bozhong sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 5-13.
- [4] 庞雄奇, 郭永华, 姜福杰, 等. 渤海海域优质烃源岩及其分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 393-397.
Pang Xiongqi, Guo Yonghua, Jiang Fujie, et al. High-quality source rocks and their distribution prediction in the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 393-397.
- [5] 张永丰. 霸县凹陷古近系烃源岩类型划分[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 19(18): 132-133.
Zhang Yongfeng. Classification of source rocks in Paleogene of Baxian Sag[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 19(18): 132-133.
- [6] 李欣, 郑署泓, 彭宁, 等. 冀中霸县凹陷古近系深层油气资源潜力研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 600-605.
Li Xin, Zheng Shuhong, Peng Ning, et al. Analysis of deep-seated hydrocarbon resource potential of Palaeogene in the Baxian Sag, Central Hebei Province[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 600-605.
- [7] 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等. 渤海湾盆地牛东1井超深潜山高温油气藏的发现及其意义[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 915-925.
Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, et al. Niudong1 ultra-deep and ultra-high temperature subtle buried hill field in Bohai Bay Basin: Discovery and significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 915-925.
- [8] 赵贤正, 李宝刚, 卢学军, 等. 霸县凹陷文安斜坡油气富集规律及主控因素[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 730-734.
Zhao Xianzheng, Li Baogang, Lu Xuejun, et al. Rule and main control factor of hydrocarbon enrichment in Wen'an slope, Baxian Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 730-734.
- [9] Zhao Xianzheng, Liu Changjing, Jin Fengming, et al. Petroleum genetic types and oil-gas sources of deep reservoirs in Baxian Depression, Northeast China[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 134: 105-113.
- [10] 杨明慧, 刘池阳, 孙冬胜, 等. 冀中拗陷的伸展构造系统及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(2): 113-120.
Yang Minghui, Liu Chiyang, Sun Dongsheng, et al. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong basin, China[J]. Geotectonic et Metallogenia, 2002, 26(2): 113-120.
- [11] 纪友亮, 赵贤正, 单敬福, 等. 冀中拗陷古近系沉积层序特征及其沉积体系的演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 48-56.
Ji Youliang, Zhao Xianzheng, Shan Jingfu, et al. Depositional architecture of Paleogene system tectonic sequences and evolution of sedimentary system in Jizhong Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 48-56.
- [12] 张文朝, 崔周旗, 韩春元, 等. 冀中拗陷老第三纪湖盆演化与油气[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 45-54.
Zhang Wenchao, Cui Zhouqi, Han Chunyuan, et al. Evolution of Palaeogene lacustrine basins and oil and gas potentials in the Central Hebei Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 45-54.
- [13] 张文朝, 崔周旗, 降栓奇, 等. 冀中拗陷古近系沉积、储层与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 20-21.
Zhang Wenchao, Cui Zhouqi, Jiang Shuanqi, et al. Deposition, reservoir and oil and gas in the Paleogene of Jizhong Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 20-21.
- [14] 侯杰, 张善文, 肖建新, 等. 济阳拗陷优质烃源岩特征与隐蔽油气藏的关系分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 137-146.
Hou Dujie, Zhang Shanwen, Xiao Jianxin, et al. The excellent

- source rocks and accumulation of stratigraphic and lithologic traps in the Jiyang Depression, Bohai bay basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 137-146.
- [15] 朱光有, 金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 506-512.
Zhu Guangyou, Jin Qiang. Geochemical characteristics of two sets of excellent source rocks in Dongying depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 506-512.
- [16] 卢双舫, 马延伶, 曹瑞成, 等. 优质烃源岩评价标准及其应用: 以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(3): 535-544.
Lu Shuangfang, Ma Yanling, Cao Ruicheng, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications: Taking the Wuertun Sag in Hailaer Basin as an example [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3): 535-544.
- [17] 刘旭明, 张成. 南海南部万安盆地烃源岩成熟史数值模拟研究[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(2): 34-37.
Liu Xuming, Zhang Cheng. Numerical simulation of source rock maturity history in Wan'an basin, Southern South China Sea [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(2): 34-37.
- [18] 赵利杰, 蒋有录, 刘华, 等. 饶阳凹陷烃源岩热演化特征及其与油藏分布的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(4): 1-4.
Zhao Lijie, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Thermal evolution of Paleogene source rocks and relationship with reservoir distribution in Raoyang sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(4): 1-4.
- [19] Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(4): 323-339.
- [20] 黄正吉. 中国近海优质烃源岩的发育特征及古生态标志[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(5): 10-16, 26.
Huang Zhengji. Growth and paleoecological marker of high-grade source rocks in China marginal seas [J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(5): 10-16, 26.
- [21] Chen J Y, Bi Y P, Zhang J G, et al. Oil-source correlation in the Fulin basin, Shengli petroleum province, East China [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(8/9): 931-940.
- [22] Chen J Y, Li S F, Xiong Y, et al. Multiple petroleum systems in Tertiary extensional basins, East China: A case study of the Gunan-Fulin basin [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(1): 105-118.
- [23] Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al. Mechanisms of petroleum accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay Basin, China: Part I: Origin and occurrence of crude oils [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1 528-1 542.
- [24] Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al. Charging of oil fields surrounding the Shaleitian uplift from multiple source rock intervals and generative kitchens, Bohai Bay basin, China [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 1 910-1 926.
- [25] 李守军. 正烷烃、姥鲛烷与植烷对沉积环境的指示意义——以山东济阳坳陷下第三系为例[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1999, 23(5): 14-16.
Li Shoujun. Sedimentary environmental significance of normal alkane and the ratio of pristane to phytane [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 1999, 23(5): 14-16.
- [26] Moldowan J M, Sundararaman P, Schoell M. Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of SW-Germany [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(4): 915-926.
- [27] 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.
Zhang Liping, Huang Difan, Liao Zhiqin. Gammacerane—geochemical indicator of water column stratification [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1): 136-140.
- [28] Volkman J K. Biological marker compounds as indicators of the depositional environments of petroleum source rocks [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1988, 40(1): 103-122.
- [29] Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al. Charging of the Neogene Penglai 19-3 field, Bohai Bay Basin, China oil accumulation in a young trap in an active fault zone [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(2): 155-179.
- [30] Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(8): 1 015-1 037.
- [31] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(12): 1 777-1 794.
- [32] 吴玉坤, 胡明毅, 柯岭, 等. 利用地震相识别优质烃源岩——以辽中凹陷沙三段为例[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 366-373.
Wu Yukun, Hu Mingyi, Ke Ling, et al. Identification of high-quality source rocks by seismic facies: Taking the third member of Shahejie Formation in Liaozhong Depression as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 366-373.
- [33] 黄薇, 王志国, 董景海, 等. 地震资料在徐家围子断陷沙河子组潜在烃源岩预测中的应用[J]. *世界地质*, 2013, 32(3): 571-578.
Huang Wei, Wang Zhiguo, Dong Jinghai, et al. Application of seismic data for forecasting hydrocarbon source rocks in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression [J]. *Global Geology*, 2013, 32(3): 571-578.
- [34] 李先平, 赵伟森, 靳国庆, 等. 冀中坳陷霸县凹陷新近纪构造活动及其对油气成藏的控制[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 30(2): 35-39.
Li Xianping, Zhao Weisen, Jin Guoqing, et al. Tectonic activity of Baxian Sag in Jizhong Depression in Neogene and its control to hydrocarbon accumulation [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2015, 30(2): 35-39.
- [35] Min Bin, Xin Weijiang, Zhang Haijun, et al. Sequence stratigraphy and reservoir potential in the Wenan inner-slope of the Baxian sag, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2015, 68: 695-704.