

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-3754. 2016. 06. 001

方正断陷原油来源与生排烃模式

蒙启安¹ 冯子辉¹ 张帆¹ 邹艳荣² 方伟¹

(1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 方正断陷是位于依舒地堑中部的小型断陷盆地, 已发现轻质油和正常原油。对各层位的烃源岩地化特征进行了分析, 并利用甾萜烷等生物标志物进行油源对比和生排烃模拟实验, 对煤系烃源岩的生排烃潜力进行研究, 建立了烃源岩生排烃模式。结果显示: 原油主要来源于古近系的新安村+乌云组, 轻质油主要来源于煤, 正常原油主要来源于油页岩; 煤和油页岩都可生成较高成熟度的天然气; 烃源岩排油门限为 150 mg/g, 大约对应源岩成熟度 $R_o = 0.65\%$, 具有排烃较早和生排烃潜力较大的特点。

关键词: 方正断陷; 原油; 油源对比; 生排烃模式

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3754 (2016) 06-0001-05

SOURCES OF THE CRUDE OIL AND HYDROCARBON GENERATING AND EXPULSION MODEL IN FANGZHENG FAULT DEPRESSION

MENG Qi'an¹, FENG Zihui¹, ZHANG Fan¹, ZOU Yanrong², FANG Wei¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co Ltd., Daqing 163712, China;

2. Guangzhou Geochemical Research Institute of China Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Fangzheng Fault Depression is a small rifted basin located in Central Yishu Graben which at east side of the Songliao Basin, the light and normal oils have been discovered. The geochemical characteristics of the hydrocarbon source rocks in each layer were analyzed, and moreover with the help of the biological markers such as sterane and terpane and so on, the oil source correlations and simulating experiment of the hydrocarbon generation and expulsion were conducted, and then the potentials of the above two aspects were figured out for the source rocks in the coal measures, finally the corresponding two modes was established. The study achievements show that the crude oil mainly originates from Paleogene Xin'ancun and Wuyun Formations, the light oil principally come from the coal, while the normal crude oil generally come from the oil shale; both coal and oil shale can generate the natural gas with much higher maturity; the expulsion threshold of the hydrocarbon is 150 mg/g, i. e. corresponds the maturation of the source rocks ($R_o = 0.65\%$ or about), thus much more obvious characteristics are shown as follows: earlier generation and greater potentials of both generation and expulsion for the hydrocarbon.

Key words: Fangzheng Fault Depression; crude oil; oil-source correlation; hydrocarbon generation and expulsion model

收稿日期: 2016-02-03 改回日期: 2016-07-31

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05003-002)。

作者简介: 蒙启安, 男, 1964年生, 教授级高级工程师, 从事石油勘探及地质研究工作。

E-mail: mengqian@petrochina.com.cn

方正断陷位于松辽盆地东侧的依舒地堑的中部，为一小型断陷盆地^[1]（图 1），基底为古生界花岗岩和变质岩，自下而上发育白垩系的穆棱组，古近系的新安村 + 乌云组、达连河组、宝泉岭组，新近系的富锦组和第四系^[2]。乌云组和新安村组是主要目的层，地层厚度 1 300 ~ 2 400 m，暗色泥岩分布广，厚度为 60 ~ 240 m，暗色泥岩及夹在其中的煤是潜在的油源岩，有机质类型为 III 型^[3-4]。Fang6、Fang 4、Fang15 井相继获得高产工业油气流，证实了方正断陷具有较大的勘探潜力^[5]。前人^[6]通过油源对比认为 Fang15 井原油来自新安村 + 乌云组成熟的烃源岩。新安村 + 乌云组属含煤层系，生物标志物系列特征相似，以往研究未区分暗色泥岩、油页岩、煤对原油的贡献。在主要烃源岩层地化研究基础上，采用金管—高压釜体系，对油页岩、煤进行热解生烃、溶胀排烃实验，分析不同性质原油的来源，并建立了生排烃模式。

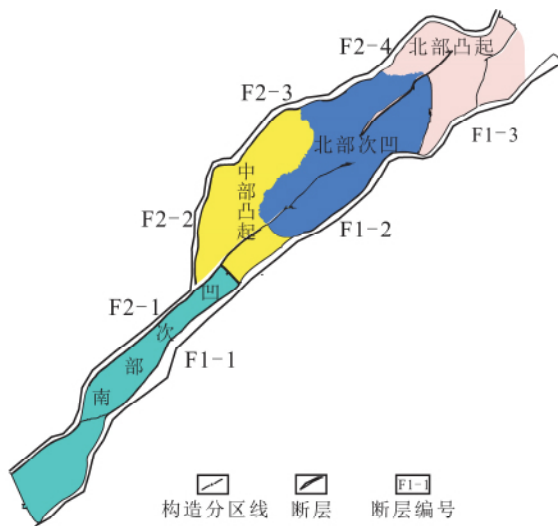


图1 方正断陷构造单元划分
Fig.1 Tectonic unit division of Fangzheng Fault Depression

1 烃源岩

沉积地层在纵向上主要发育白垩系穆棱组，古近系始新统的新安村 + 乌云组、达连河组，渐新统宝泉岭组。

穆棱组沉积于基底之上，与上覆地层呈角度不整合接触。白垩系底界在地震上对应 T_6 反射层。白垩系为湖相碎屑沉积序列，上部以杂色砂砾岩为主，夹少量深灰色泥岩；中部以深灰色泥岩为主含粉砂岩；下部为砂泥岩互层；底部为杂色花岗岩及风化壳。

古近系新安村 + 乌云组与下伏地层为不整合接

触，对应地震 T_5 反射层。沿边界断层下降盘发育了规模较大的扇三角洲，总体构成了扇三角洲—滨浅湖—半深湖—深湖沉积体系。边界断层之间以滨浅湖相、半深湖—深湖相为主，湖相沉积范围较大，其中滨浅湖沉积沿扇三角洲前缘外侧环形分布，向断陷中心变为半深湖—深湖相，是方正断陷最主要的烃源岩发育区。

新安村组岩性为杂色或浅灰色砂砾岩、灰色砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等夹黑色、绿色泥岩，发育煤系地层。乌云组在方正断陷内局部发育（仅在 Fc1 井中发现），为浅棕红色砂砾岩、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等呈不等厚互层，夹数层煤，顶部见 3 层褐色页岩。

达连河组底界面为 T_4 反射层。达连河组继承了新安村 + 乌云组沉积时期的扇三角洲—滨浅湖—半深湖—深湖沉积体系的特点，边界断层的中部仍以滨浅湖、半深湖—深湖沉积为主，但湖相沉积范围变小。达连河组沉积末期，方正断陷整体抬升，柞树岗—大林子地区受剥蚀影响，原有沉积环境及沉积相带遭破坏。达一段岩性为灰绿色砂砾岩、砂岩、粉砂岩与灰色、灰绿色泥岩、泥质粉砂岩互层。达二段岩性为灰色、灰白色砂砾岩、砂岩与灰色、灰绿色泥岩、砂质泥岩互层，夹多层煤。

渐新统宝泉岭组一段底界面为 T_3 反射层，为全区较稳定的构造不整合面，以角度不整合及假整合接触关系为主。该套地层在全区分布较稳定，是最主要的区域标志层，发育灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和油页岩。

宝二段地层底界面为 T_2 反射层，大部分与下伏地层为整合、假整合接触。宝泉岭组二段发育灰色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩与粉砂岩、砂岩、砂砾岩，夹煤层。宝泉岭组沉积晚期整体回返抬升，水体变浅，发育扇三角洲—滨浅湖沉积体系。穆棱组烃源岩主要为 III 型有机质，有少量 II 型有机质。新安村 + 乌云组主要为 II 型有机质，部分为 III 型有机质，有机碳含量较高。达连河组主要为 III 型有机质。宝泉岭组以 III 型有机质居多，少部分为 II 型有机质，个别为 I 型有机质，很多样品的 $w(TOC)$ 大于 0.5%（图 2）。

新安村 + 乌云组的 $w(TOC)$ 为 (0.5 ~ 6.5) %，评价为好级别；穆棱组 $w(TOC)$ 大多小于 1%，评价为差级别；达连河组 $w(TOC)$ 主要小于 2%，评价为差级别；宝泉岭组 $w(TOC)$ 主要为 (0.5 ~ 4) %，评价为中等—好级别。

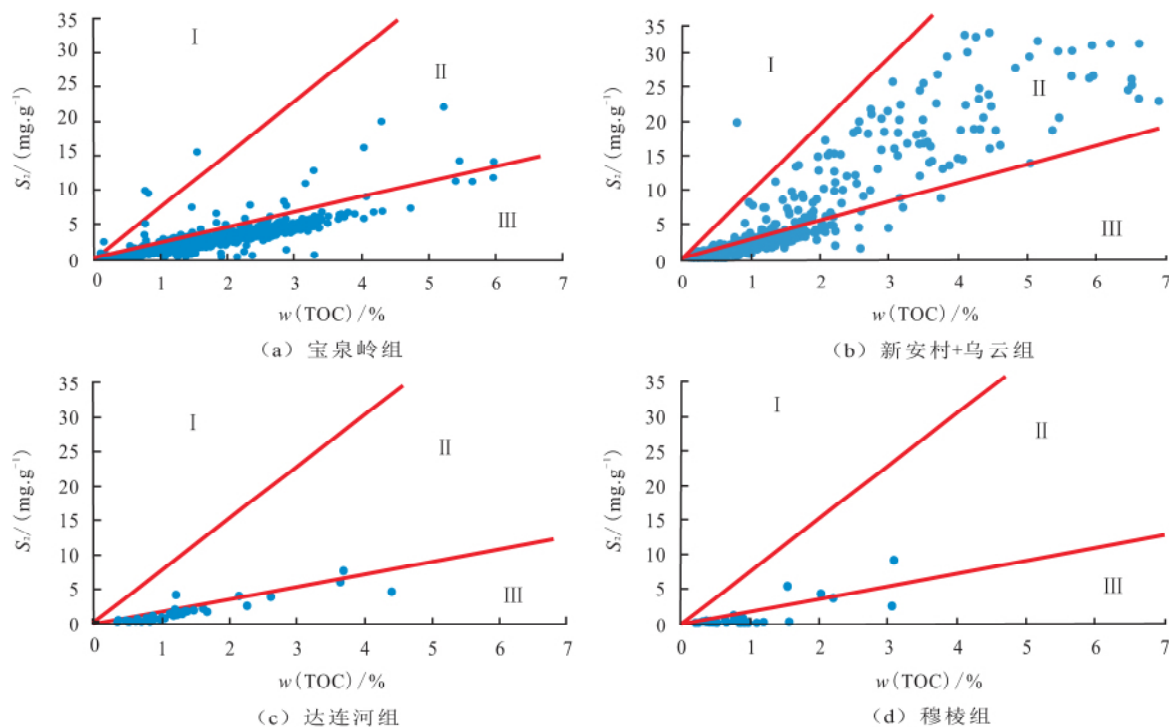


图2 方正断陷有机碳质量分数与有机质类型关系
Fig.2 Relations between the organic carbon mass fraction and organic matter type

白垩系穆棱组和古近系新安村 + 乌云组普遍达到成熟阶段, R_o 平均为 0.63%, 最大为 1.51%; 达连河组处于未熟—成熟阶段, R_o 平均为 0.52%, 最大为 0.78%; 宝泉岭组一段部分进入成熟阶段, R_o 平均为 0.53%, 最大为 0.78%, 宝二段只有 Fang8 井进入成熟阶段, R_o 最大值为 0.85%。

从岩性来看, 以 Fang4 井为代表的新安村 + 乌云组下部发育一套优质烃源岩, 岩性主要为油页岩和煤。Fang4 井新安村 + 乌云组下部黑色油页岩厚度为 95.65m, $w(\text{TOC})$ 平均为 7.392%; 煤厚度 15.23 m, $w(\text{TOC})$ 平均为 47.10%; 而上部泥岩厚度 90.18m, $w(\text{TOC})$ 平均为 0.905%, 且 R_o 值最大为 0.53%, 生烃潜力小。

综合而言, 古近系新安村 + 乌云组在有机质类型、有机碳含量和成熟度方面均显示出好的烃源岩特征, 尤其下部的油页岩和煤层生烃潜力大; 白垩系穆棱烃源岩次之。受成熟度和有机质类型的制约, 达连河组和宝泉岭组对油气生成贡献有限。

2 原油来源

方正断陷已经有多口探井见到油气显示, 其中 Fang4、Fang6、Fang8 和 Fang 15 井获得工业油流。在方正断陷内的老尖山玄武岩孔洞中发现了轻质

油、膏状油及固体蜡等 3 种状态油苗。张树林等人^[4]认为达连河组和新安村组生成的油气沿断裂运移至老尖山玄武岩孔、洞、缝中。方正断陷老尖山采石场新近系玄武岩孔洞中见轻质原油, 油源对比表明其来自于白垩系。

方正断陷已发现石油以轻质油为主, 原油密度为 (0.784 5 ~ 0.860 1) g/cm^3 ; 族组成以饱和烃为主, 饱和烃、芳烃、非烃、沥青质体积分数分别为 73.2%、18.8%、5.3%、2.6%。碳数可达 $n\text{C}_{35}$, 主峰碳多为 $n\text{C}_{19}$ 。正构烷烃是油气的主要烃类组成, 是油气成熟度和来源的标志, 被广泛的应用于油源对比中^[7]。在主峰碳附近, $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 与 Ph/C_{18} 比值反映母源的形成环境与成熟度。方正断陷的轻质原油可能来源于成熟的相对氧化的环境, 与新安村 + 乌云组及穆棱源岩较为接近 (图 3)。

对于轻质油和成熟度较高的烃源岩而言, 更高碳数的生物标志化合物因其稳定性相对较差、含量少, 易被轻质部分稀释, 使得油源对比变得困难。但有些高碳数生标依然能够提供一些有益的信息。原油中 T_s/T_m 值很低, 可能与轻质烃的稀释有关, 不能真实反映成熟度。原油与新安村 + 乌云组及穆棱源岩较为接近 (图 4)。 φ (奥利烷) / φ (藿烷) 与母源被子植物和陆源影响环境密切相关, 因此方正断陷原油可能来源于相对氧化的环境。

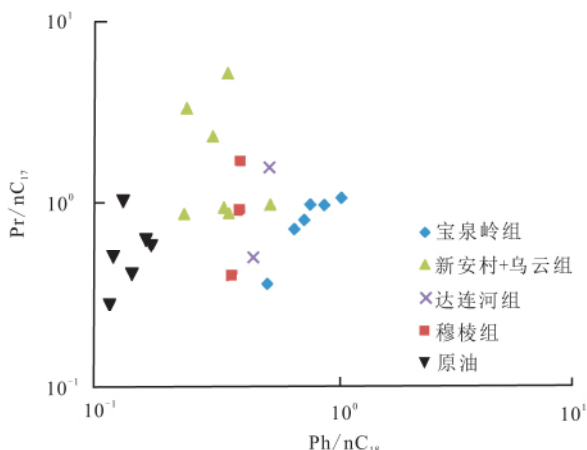
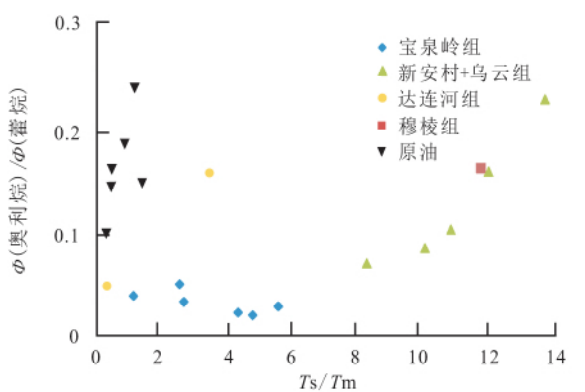
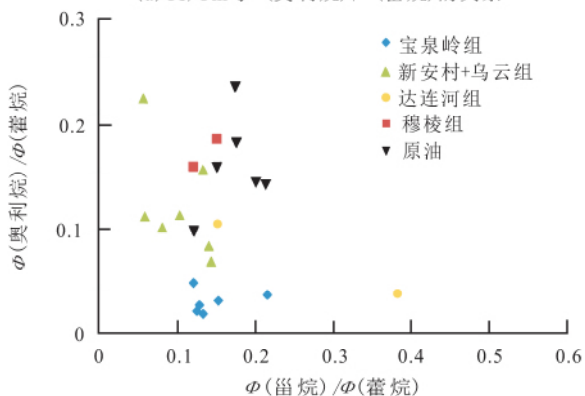


图3 方正断陷原油和烃源岩 Pr/nC₁₇与Ph/C₁₈关系

Fig.3 Relations between Pr/nC₁₇ and Ph/C₁₈ for the crude oil and source rocks of Fangzheng Fault Depression



(a) T_s/T_m 与 $\phi(\text{奥利烷})/\phi(\text{藿烷})$ 的关系



(b) $\phi(\text{甾烷})/\phi(\text{藿烷})$ 与 $\phi(\text{奥利烷})/\phi(\text{藿烷})$ 的关系

图4 方正断陷 $\phi(\text{奥利烷})/\phi(\text{藿烷})$ 与 T_s/T_m 、 $\phi(\text{甾烷})/\phi(\text{藿烷})$ 的关系

Fig.4 Relationship between the oleanane/hopane ratio and T_s/T_m for Fangzheng Fault Depression

从烃源岩发育及后期破坏情况以及有机质类型、丰度等分析,方正断陷的原油来源于新安村+乌云组成熟烃源岩的可能性非常大。但从生物标志化合物角度,详细区分原油是来源于泥质岩还是炭质泥岩,依然是十分困难的。

3 生排烃模式

油气生成以后,从烃源岩内部向外运动称为初次运移或排烃。并非生成的油气都能从烃源岩中排出,必须满足烃源岩的吸附/溶解以后,才能发生排烃。因而,生排烃模式的建立,既要掌握油气生成量,也要了解油气在烃源岩中的滞留量。

油气的生成有开放体系热解、封闭体系热解等一些实验方法。采用金管—高压釜热解实验方法求取油气的生成量,其不但能够提供天然气、轻质油和正常油的产率,而且热解剩余的样品还可供进一步研究。通过对热解剩余干酪根样品的溶胀实验,掌握不同演化阶段干酪根对油气的吸附/溶解能力,从而确定留烃量;借助于剩余干酪根的 Rock-Eval 热解 T_{max} 参数,了解其成熟度。热解样品为新安村+乌云组的油页岩和煤样,代表了方正断陷 2 种主要的烃源岩类型,热解烃产率涵盖了大部分好的烃源岩。油页岩的取样深度为 3 194.49 m, $w(\text{TOC})$ 为 12.2%, T_{max} 为 438 °C, S_1 为 2.37 mg/g, S_2 为 64.71 mg/g, H_1 为 529.54; 煤的取样深度为 3 199.22 m, $w(\text{TOC})$ 为 68.3%, T_{max} 为 420 °C, S_1 为 6.12 mg/g, S_2 为 167.44 mg/g, H_1 为 245.05。

热解生烃实验在 2 °C/hm、6 °C/hm 和 20 °C/hm 升温速率下进行。分别对热解气态烃、 C_{6-14} 烃和 C_{14}^+ 进行定量。对剩余固体有机质进行了 Rock-Eval 热解和溶胀实验^[8-9]。油页岩干酪根热解产率高,剩余干酪根很少,无法进行溶胀实验,用煤的干酪根溶胀比作油页岩留烃量计算,会略微低估其留烃潜力。

通常,热解实验的气态烃产率以 mL/g 计量,而液态烃产率以 mg/g 计量。根据单分子气态烃产率和分子量,将气态烃产率单位换算为 mg/g,便于气体和液体产物间的比较。以残余干酪根最高热解温度 (T_{max}) 为纽带,可以建立生排烃模式(图 5、图 6)。正常油、轻质油和天然气的产率是累计产率,即从生烃开始累计生烃量。由于正常油比轻质油更易在源岩中滞留、天然气最容易排出烃源岩,为了清晰起见,不同烃类间的差值表示其生、排烃量^[10-12]。

按烃质量计算,煤生成和排出的天然气和轻质烃量大体相当,天然气略多;方正断陷的煤具有一定的正常油生成和排出潜力,正常油和轻烃的排烃量均在 50 mg/g 左右。值得注意的是,方正断陷油

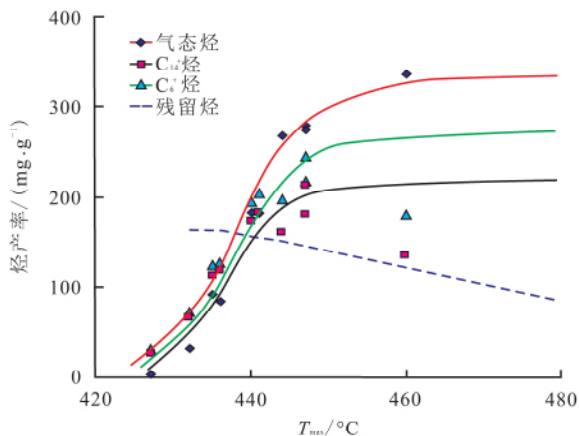


图5 方正断陷煤的生排烃模式
Fig.5 Mode of the hydrocarbon generation and expulsion for the coal of Fangzhen Fault Depression

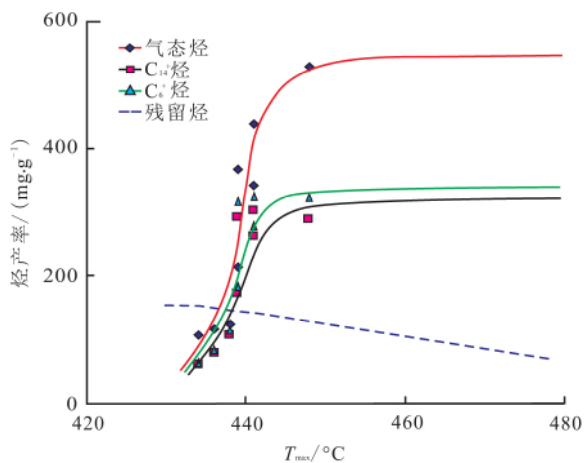


图6 方正断陷油页岩的生排烃模式
Fig.6 Mode of the hydrocarbon generation and expulsion for the oil shale of Fangzhen Fault Depression

页岩的天然气产率并不低,排出的天然气在200 mg/g左右;正常油可排出150 mg/g;而轻质油无论生成量还是排出量明显低很多,约为30 mg/g左右。油页岩以正常油和天然气为主要生排产物。

方正断陷烃源岩具有较高的生排烃潜力,可能找到天然气、轻质油和正常油;正常油主要来自于油页岩,轻质油主要来源于煤^[13-14]。

就排烃时机来说,方正断陷烃源岩排烃较早,在 T_{max} 接近440°C时(相当于 $R_o = 0.65\%$ 附近)发生排烃作用,可能与有机质的组成有关。

4 结 论

(1) 方正断陷的原油来源于古近系新安村 + 乌

云组,轻质油主要来源于煤,而正常油主要来自于油页岩,煤和油页岩都可生成较高成熟度的天然气。

(2) 方正断陷的生排烃模式展示,排油门限为150 mg/g,大约对应源岩的 $R_o = 0.65\%$,具有排烃较早、生排烃潜力较大的特点。

参考文献:

- [1] 邵盟一,杨建国,王洪伟,等. 黑龙江省东部方正断陷内部格局的新认识及沉积-构造演化[J]. 古地学期刊, 2013, 15(3): 339-350.
- [2] 吴河勇,王世辉,杨建国,等. 大庆外围盆地勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(4): 23-30.
- [3] 金奎,严萌. 塔木察格盆地塔南凹陷下白垩统烃源岩评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(5): 25-31.
- [4] 张树林,陈章明,方祖康. 方正地区老尖山玄武岩节理分布特征及其油苗成因探讨[J]. 大庆石油学院学报, 1992, 16(4): 117-122.
- [5] 席勤,余和中,顾乔元,等. 塔里木盆地阿瓦提凹陷主力烃源岩探讨及油源对比[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(1): 12-18.
- [6] 张晓畅. 方正断陷方15井烃源岩评价及油源对比[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 14(7): 127-128.
- [7] 梁晓飞,曹占元,吴远东,等. 冷湖地区油砂有机地球化学特征[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 33-37.
- [8] Wei Zhifu, Zou Yanrong, Cai Yulan, et al. Kinetics of oil group-type generation and expulsion: An integrated application to Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Organic Geochemistry, 2012, 52(6): 1-12.
- [9] 蔡玉兰,张馨,邹艳荣. 溶胀: 研究石油初次运移的新途径[J]. 地球化学, 2007, 36(4): 351-356.
- [10] Ritter U, Grover A. Adsorption of petroleum compounds in vitrinite [J]. Coal Geology, 2005, 62(3): 183-191.
- [11] Ritter U. Fractionation of petroleum during expulsion from kerogen [J]. Geochemical Exploration, 2003, 78(8): 417-420.
- [12] Ritter U. Solubility of petroleum compounds in kerogen: implications for petroleum expulsion [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(2): 319-326.
- [13] 李瑜. 渤海湾盆地新近系油气资源潜力与勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(1): 54-57.
- [14] 韩会平,武春英,季海琨,等. 苏里格南部地区上古生界天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 33-36.

编辑: 王雪峰