

文章编号: 0253-2697(2012)03-0379-06

## 松辽盆地北部青山口组一段有效烃源岩评价图版的建立及意义

霍秋立 曾花森 张晓畅 付丽

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

**摘要:**有效烃源岩是指已经生烃且排烃的沉积岩,排烃的临界值是指烃源岩的生烃量刚好达到烃源岩的最大残留烃量。根据质量守恒原理建立了松辽盆地北部青山口组一段(简称青一段)有效烃源岩的识别图版,有效烃源岩识别图版综合考虑了烃源岩有机质丰度、类型和成熟度的影响,从而避免了传统烃源岩评价中将上述3种参数分别评价的不足,可以快速直观地评价烃源岩的有效性及其排烃潜力。高有机碳含量的烃源岩易于排烃,且所需的热演化程度相对较低,而当有机碳含量低于0.4%时,烃源岩不能排烃,为烃源岩的有机碳含量下限。利用该图版对松辽盆地中央坳陷区不同凹陷的青一段烃源岩进行的评价结果表明,齐家—古龙凹陷、长垣南、三肇凹陷、王府凹陷源岩均可大量排烃,而黑鱼泡凹陷烃源岩位于排烃临界线之下或附近,排烃潜力有限。这与目前勘探结果相吻合,表明该图版的有效性,可用于优选勘探区带,降低勘探风险。

**关键词:**松辽盆地;青山口组一段;有效烃源岩;排烃;评价图版

中图分类号:TE125.2

文献标识码:A

## An evaluation diagram of effective source rocks in the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin and its implication

HUO Qiuli ZENG Huasen ZHANG Xiaochang FU Li

(Research Institute of Exploration & Development, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China)

**Abstract:** An effective source rock is defined as sedimentary rocks that have generated and expelled petroleum. An expulsion critical value is reached when the petroleum generation mass equals the remained mass in a source rock. An identification diagram for effective source rocks in the first member of the Qingshankou Formation ( $K_2qn_1$ ) in the northern Songliao Basin was established based on the mass conservation principle. This diagram integrates an organic carbon content, organic type and maturity of source rocks, while these parameters in the conventional source rock assessment are considered somewhat separately. Thus, the diagram can be used to quickly and directly assess the effectiveness and expulsion potential of a source rock. The diagram shows that a source rock with high content of organic matter is more ready to expulse petroleum than that with low content of organic matter, moreover, the former requires a comparatively low maturity to generate petroleum. When TOC is lower than 0.4% (i.e. the lower limit of TOC needed for a source rock), petroleum expulsion cannot occur in source rocks. The diagram was then applied to the assessment of the  $K_2qn_1$  source rock in the central depression of Songliao Basin, which indicates that the Qijia-Gulong Depression, the south of the Changyuan, and the Sanzhao and Wangfu Depressions all have experienced mass expulsion of petroleum, while the Heiyupao Depression has a limited potential of petroleum expulsion. The accuracy and effectiveness of the diagram were verified by the intensity of petroleum occurrence in these areas, indicating that the diagram can be used to optimize exploration targets and decrease the risk of exploration.

**Key words:** Songliao Basin; the first member of the Qingshankou Formation; effective source rock; hydrocarbon expulsion; evaluation diagram

烃源岩是油气形成的物质基础。烃源岩生烃潜力评价是地球化学研究的重要内容之一,也是油气勘探关注的重要方面。近年来对烃源岩的研究着重于有效烃源岩和优质烃源岩的研究<sup>[1-11]</sup>。然而,不同学者对有效烃源岩的定义不同:一些学者认为有效烃源岩是指正在生油或已生成并排出油气的沉积岩<sup>[12-18]</sup>;另有学者则认为有效烃源岩是指已生成并排出大量烃类流体的岩石,对油气成藏有贡献<sup>[14]</sup>。后者的定义强调烃源岩对成藏的贡献,但在实际工作中特别是在勘探程

度较低的地区,油—岩关系尚未确立或非常复杂,不利于预测有效烃源岩的分布。基于此,文中有效烃源岩是指已生成并排出油气的沉积岩。

烃源岩评价一般根据一定的评价标准对烃源岩的有机质丰度、有机质类型及成熟度分别进行评价、分级,得出烃源岩的生烃潜力<sup>[13,15]</sup>。根据不同埋深烃源岩地球化学参数的变化来确定源岩的生排油门限。但目前还没有一种直接来确定源岩有效性的图版,笔者选取松辽盆地青山口组一段(简称青一段)典型湖相烃

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB701404)资助。

第一作者及通讯作者:霍秋立,男,1966年9月生,1993年获长春地质学院地球化学专业硕士学位,现为大庆油田有限责任公司勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气地球化学研究。E-mail:huoql@petrochina.com.cn

源岩,根据质量守恒原理,探讨了有效烃源岩的量化评价方法并建立了识别图版。

## 1 地质概况

松辽盆地是中国东部叠置于古生代基底上的大型中—新生代沉积盆地,具有明显的下断上坳的双重结构及高地温、高热流等特征,反映出大陆边缘裂谷盆地的特征<sup>[16]</sup>。盆地演化经历了成盆先期褶皱阶段(晚二叠世至三叠纪)、初始张裂阶段(中—晚侏罗世)、裂陷阶段(早白垩世火石岭组到登娄库组沉积时期)、拗陷阶段(早白垩世泉头组到晚白垩世嫩江组沉积时期)和萎缩平衡阶段(晚白垩世四方台组至第四纪沉积时期)。拗陷期沉积了早白垩世泉头组、晚白垩世青山口组、姚家组和嫩江组地层(图1)。这期间发生了两次大

的海侵事件:一次在青山口组一段沉积时期(相当于 Cenomanian 期),湖泊最大面积达  $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;另一次在嫩江组一、二段沉积时期(相当于 Campanian 期),湖泊面积超过了  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。这两个时期与全球海平面上升时期相一致,大范围的水体形成了大面积厚层的深湖相黑色页岩夹油页岩,为盆地最重要的烃源岩<sup>[17]</sup>。而泉头组三、四段及姚家组沉积时期盆地基准面上升,沉积范围局限,此时河流作用强盛,发育河流相、三角洲分流平原相、三角洲前缘相沉积,砂体厚度大,连通性好,为油气提供了良好的储集空间,与青一段、嫩江组一、二段烃源岩相互匹配形成了多套良好的生储盖组合。

烃源岩地球化学研究表明,松辽盆地青一段泥岩有机质丰度高,总有机碳含量(TOC)均值为 2.2%,有机质类型为 I—II<sub>A</sub> 型,中央拗陷区烃源岩大部分处于成熟演化阶段<sup>[16]</sup>,为大油田的形成奠定了物质基础。

## 2 有效烃源岩评价方法及识别图版

评价有效烃源岩的关键是识别烃源岩是否排烃,根据质量守恒原理,排烃量等于生烃量与残留烃量(主要包括有机质、矿物的吸附量和孔隙的滞留量)的差值。显然,当生烃量刚好达到烃源岩的最大残留烃量时,烃源岩即开始排烃;根据有效烃源岩的定义,只要烃源岩达到或超过这个界值,即可评价为有效烃源岩。因此,有效烃源岩的识别关键在于生烃量及烃源岩最大残留烃量的确定。

### 2.1 烃源岩残留烃量的确定

烃源岩主要由无机矿物(岩石骨架)、有机质及孔隙组成(图2)。在未成熟的条件下,干酪根尚未向液态烃转化,孔隙中无烃类;在低成熟和成熟早期演化阶段,烃源岩中部分干酪根转化为液态烃,但此时尚未能超过自身有机质和无机矿物的吸附量,孔隙中没有滞留烃;成熟阶段的生油高峰期,烃源岩的生油量大大超过了自身有机质和无机矿物的吸附量,有大量的油排到孔隙中,同时当孔隙中的滞留烃量达到一定含油饱和度时,油开始排出到烃源岩外;温度继续升高后,被有机质和无机矿物吸附的油开始裂解成气。烃源岩达到排烃所需孔隙含油饱和度前人认为在 1%~10%<sup>[18]</sup>,也有认为在 50%左右<sup>[19]</sup>。通过 England 报道的实验结果看,当孔隙度平均为 8.7%时,油流动并排出所需的饱和度平均值为 57%<sup>[19]</sup>。根据松辽盆地生油门限的研究,松辽盆地主力烃源岩区青山口组主力烃源岩的生油门限在 1400~1700 m<sup>[20]</sup>,而 1700 m 时松辽盆地泥岩的孔隙度大致为 10%,之后随深度的增加,孔隙度变化不大<sup>[21]</sup>,源岩排烃时孔隙含油饱和度取 50%左右比较符合研究区的情况。

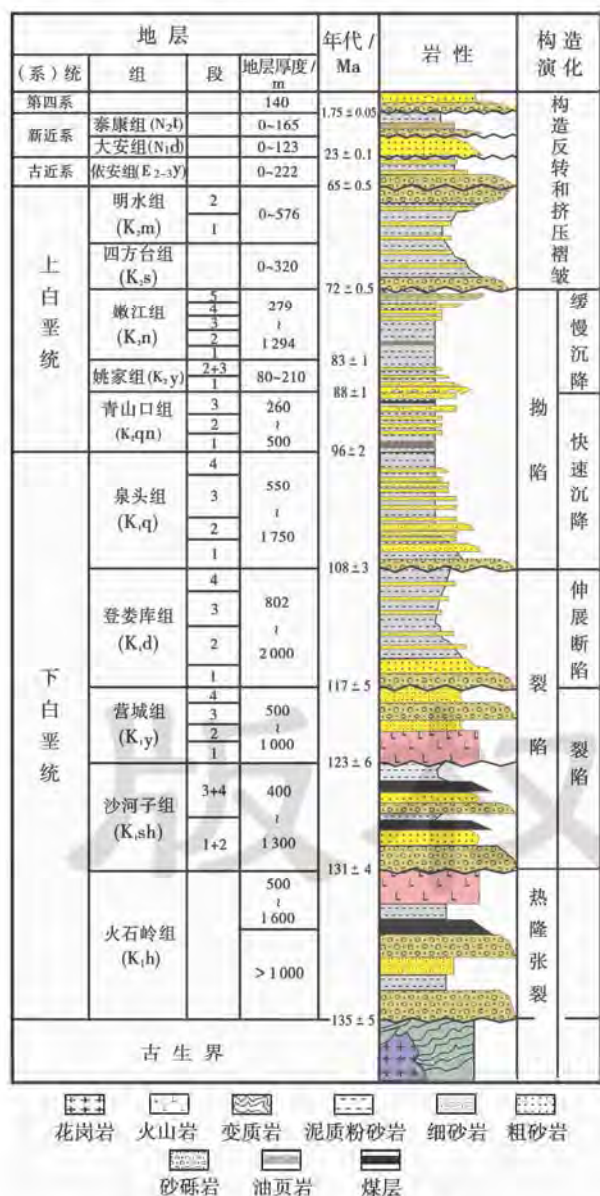
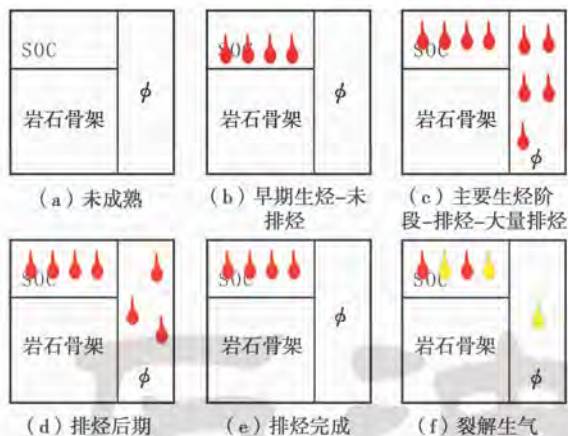


图1 松辽盆地沉积地层柱状图

Fig. 1 Stratigraphic column of Songliao Basin





注: SOC 为固体有机质。

图2 烃源岩生烃及排烃过程

Fig. 2 Process of hydrocarbon generation and expulsion in source rock

烃源岩残留烃量主要包括3部分:一部分是有机质的吸附量,即干酪根网络的吸附量;一部分为无机矿物吸附量;另一部分为孔隙滞留烃量。烃源岩中的矿物对油气具有较大的吸附作用<sup>[22-23]</sup>,但由于地下烃源岩是含水的,黏土矿物的水润湿性使其表面的油气吸附量几乎可以忽略<sup>[18]</sup>,因此,本次研究中吸附量只考虑了有机质吸附量。过去的研究一般认为烃源岩中烃的吸附量主要是有机质网络吸附量,而孔隙的滞留烃量可以忽略<sup>[24]</sup>。事实上,无论是从对松辽盆地青一段正在排烃的烃源岩岩心的观察,还是当前页岩油、页岩气的发现来看,孔隙的滞留烃量都不应简单忽略,关键是如何界定孔隙滞留烃量与有机质吸附量。当烃源岩排烃完成而吸附烃尚未开始裂解时,烃源岩的吸附量则主要反映干酪根网络的吸附量。通过对松辽盆地青一段不同演化阶段烃源岩地球化学参数的观察发现,烃源岩在成熟晚期阶段( $R_o$ 为1.2%~1.3%),不同埋深烃源岩的热解 $S_1$ 与 $T_{oc}$ 之间具有较好的相关性(图3),随着有机质丰度的增加 $S_1$ 增大,因此,烃源岩中的残留烃主要反映的是有机质的吸附量。

这一阶段烃源岩的 $S_1/T_{oc}$ 的统计数据可以大致代表烃源岩中有机质的最大吸附量。青一段烃源岩有机质的最大吸附量主要分布在70~110 mg/g(图4),平均为86 mg/g。单位质量的泥岩孔隙滞留烃量与泥岩的孔隙度、含油饱和度、泥岩密度、地下原油密度有关,其计算公式为

$$\beta = \frac{\phi_{sh} \cdot S_o}{\rho_r} \cdot \rho_o \cdot 1000 \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为单位质量泥岩孔隙滞留烃量,mg/g; $S_o$ 为泥岩中石油饱和度,%; $\phi_{sh}$ 为泥岩孔隙度,%; $\rho_r$ 为泥岩密度,g/cm<sup>3</sup>; $\rho_o$ 为地下原油密度,g/cm<sup>3</sup>。

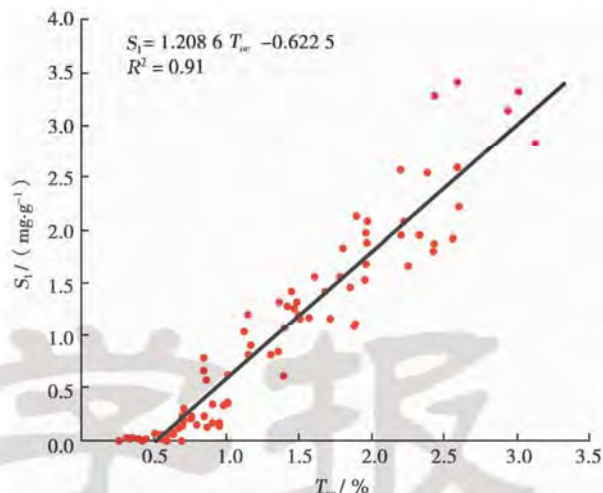


图3 松辽盆地青一段泥岩有机碳含量与 $S_1$ 之间的关系

Fig. 3 The relation of TOC with  $S_1$  of the first member of Qingshankou Formation source rock in Songliao Basin

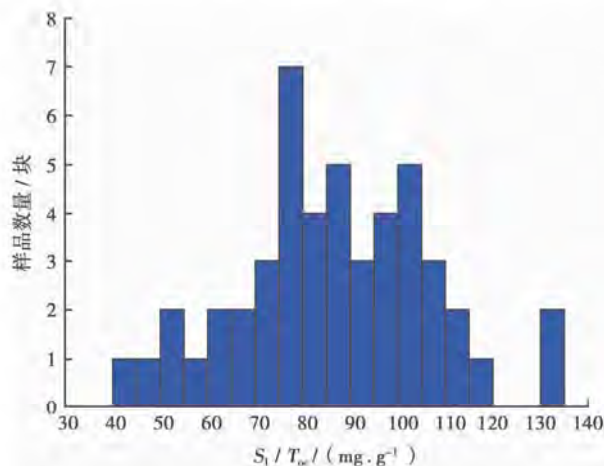


图4 松辽盆地青一段源岩 $S_1/T_{oc}$ 分布

Fig. 4 Distribution of  $S_1/T_{oc}$  of the first member of Qingshankou Formation source rock in Songliao Basin

由于研究中主要考虑成熟早期~成熟中期的源岩,源岩基本处于相近的压实演化阶段,根据松辽盆地的实际地质条件,泥岩孔隙度及含油饱和度分别取10%及50%<sup>[19]</sup>;地下原油密度为0.6 g/cm<sup>3</sup>,泥岩密度为2.6 g/cm<sup>3</sup>,由此计算 $\beta$ 为12.5 mg/g。

## 2.2 烃源岩排烃临界转化率的确定

烃源岩的有机质转化率表示干酪根向油气的转化程度大小,当烃源岩中干酪根向油气的转化量刚好等于烃源岩中有机质的吸附量与孔隙滞留量之和时,烃源岩开始排烃,此时的转化率即为烃源岩排烃的临界转化率。根据质量守恒原理,有机质的转化率与原始烃量、残余有机质丰度、有机质吸附量及孔隙滞留烃量之间关系为



$$R_t = \frac{1}{x} \cdot \frac{T_{oc} \cdot (\alpha - T_0) + \beta}{T_{oc} \cdot (1205 + \alpha) + \beta} \quad (2)$$

式中:  $R_t$  为总烃转化率;  $T_{oc}$  为有机碳含量 (TOC), %;  $T_0$  为原始烃含量, mg/g;  $\alpha$  为有机质吸附烃量, mg/g;  $x$  为有效碳比例。

松辽盆地青一段湖相 I 型烃源岩原始 HI 为 867 mg/g<sup>[25]</sup>, 由此计算有效碳比例为 0.72; 低熟样品的统计分析表明  $T_0$  为 20 mg/g;  $\alpha$  为 86 mg/g。对于湖相 I 型烃源岩, 达到排油界线时, 生成的少量天然气溶解在石油中, 即也以液态烃的形式存在及排出, 因此这里的转化率采用总烃转化率。

### 2.3 青一段湖相 I 型有效烃源岩识别图版

松辽盆地青一段泥岩是典型的湖相烃源岩, 具有分布面积大, 厚度稳定, 有机质丰度高的特点。青一段烃源岩生烃动力学分析表明烃源岩的活化能分布范围窄, 主要集中在 200 kJ/mol 左右<sup>[26]</sup>, 与国外典型湖相烃源岩相似<sup>[24]</sup>。采用 Easy% $R_o$  成熟度模型, 使用生烃动力学分析软件 OrgPlus 可将式 (2) 中  $R_t$ — $T_{oc}$  的关系换算到  $R_o$ — $T_{oc}$  的关系<sup>[25]</sup>, 由此得到有效烃源岩识别图版 (图 5)。图 5 中的曲线为烃源岩的临界排烃线, 临界排烃线之上烃源岩可以排烃, 为有效烃源岩; 而临界排烃线之下的烃源岩不能排烃, 为无效烃源岩。随着烃源岩 TOC 的增大, 烃源岩排烃所需的热演化程度越低 ( $R_o$  越小), 说明高丰度的烃源岩易于更早排烃。而当烃源岩丰度低于某一界限时 ( $TOC$  小于 0.4%), 烃源岩不能排烃, 可视为烃源岩的有机碳含量下限, 该值与当前使用的陆相烃源岩有机碳含量下限

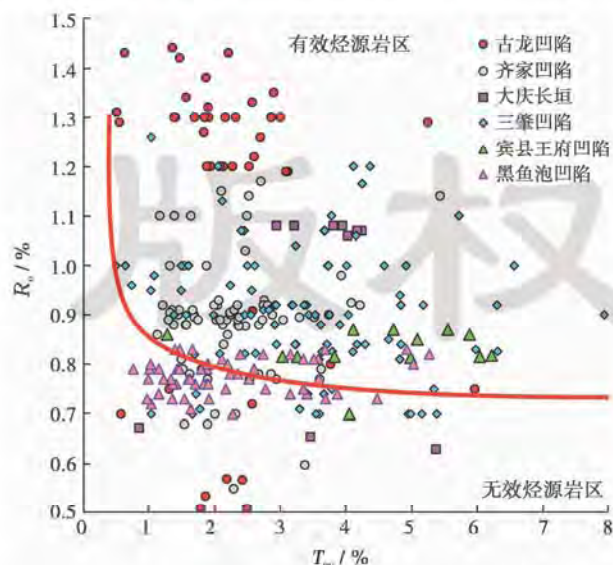


图 5 松辽盆地北部青一段有效烃源岩评价图版

Fig. 5 Diagram identification of effective source rock of the first member of Qingshankou Formation in the northern Songliao Basin

值基本一致<sup>[15]</sup>。当烃源岩 TOC 大于 2% 时, 则烃源岩在  $R_o$  为 0.75% 左右时可以排烃; 而当 TOC 为 1.0%~2.0% 时,  $R_o$  要接近 0.8% 或更高时方能排烃。当采用简单的成熟界值 (如  $R_o$  为 0.7%) 圈定有效烃源岩会夸大有效烃源岩的分布面积, 扩大勘探风险。

根据松辽盆地青一段的实际情况, 该图版综合考虑了烃源岩的丰度、成熟度及类型, 从而弥补了传统烃源岩评价中将上述 3 类参数分开评价的不足, 并可以快速直观地评价烃源岩的有效性。

### 3 应用实例

将松辽盆地北部不同凹陷青一段烃源岩样品分析数据投到图版可以看出 (图 5 和图 6), 齐家凹陷、古龙凹陷、三肇凹陷、长垣南及王府凹陷源岩均可以排烃, 古龙凹陷烃源岩的排烃潜力最大 (向上偏离临界线越远), 其次是齐家凹陷, 三肇、长垣南和王府凹陷。目前在这些地区均发现大量的石油, 与评价结果一致。

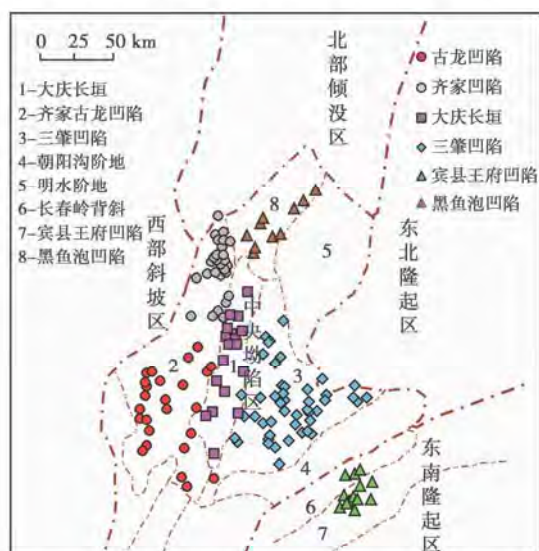


图 6 松辽盆地北部青一段烃源岩样品分布

Fig. 6 Distribution of source rock samples of the first member of Qingshankou Formation in the northern Songliao Basin

黑鱼泡凹陷是松辽盆地中央坳陷区北部青一段烃源岩埋深相对较大的一个凹陷, 烃源岩有机质丰度较高, 有机质类型主要为 I 型 (全岩镜检以层状藻为主), 且烃源岩处于成熟演化阶段 ( $R_o > 0.7\%$ )。从生油角度评价认为, 该凹陷具有一定石油勘探前景, 但从图版上可以看出, 黑鱼泡凹陷的烃源岩样品大部分在排烃临界线附近, 只有少部分样品刚超过了排烃门限。反映出黑鱼泡凹陷青一段烃源岩的排烃潜力相对有限, 与前人得出的滨北地区青山口组排油气效率均很高, 并且排烃量大的结论不同<sup>[27]</sup>。该凹陷的勘探结果只发现少量的油迹、油斑显示证实, 本区烃源岩尚未大量

排烃,与利用图版的评价结果相吻合。

## 4 结 论

(1) 烃源岩对烃的吸附量主要为有机质吸附量和泥岩孔隙滞留量。松辽盆地北部青一段烃源岩有机质吸附量在 70~110 mg/g,平均为 86 mg/g。泥岩孔隙滞留量与泥岩孔隙度、含油饱和度及地下原油密度等参数有关,为 12.5 mg/g。

(2) 松辽盆地北部青一段有效烃源岩评价图版中的排烃临界线是有机质丰度、类型和成熟度的综合反映,随着烃源岩有机质丰度的增大,烃源岩排烃所需的热演化程度越低,说明高丰度的烃源岩易于更早排烃。而当烃源岩丰度低于某一界限时(有机碳含量小于 0.4%),烃源岩不能排烃,可视为烃源岩的有机碳含量下限。

(3) 松辽盆地齐家—古龙凹陷、长垣南、三肇凹陷、王府凹陷烃源岩均可大量排烃,而黑鱼泡凹陷源岩处于排烃临界线附近及以下,排烃潜力有限。

(4) 有效烃源岩评价图版的建立可以快速、直观地识别有效烃源岩,并估算其排烃潜力,利用该方法可以有效降低勘探风险。

## 参 考 文 献

- [1] 张林峰,孔祥星,张春荣,等. 济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 35-42.  
Zhang Linfeng, Kong Xiangxing, Zhang Chunrong, et al. High quality oil prone source rocks in Jiyang Depression[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.
- [2] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 1-4.  
Jin Qiang. Importance and research about effective hydrocarbon source rocks[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(1): 1-4.
- [3] 侯俊杰,张善文,肖建新,等. 济阳坳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.
- [4] 张彩明,杜学斌. 陆相湖盆有效烃源岩识别及地质意义[J]. 青海石油, 2008, 26(2): 5-10.  
Zhang Caiming, Du Xuebin. Lacustrine effective source rock identification and its geologic implication[J]. Qinghai Shiyu, 2008, 26(2): 5-10.
- [5] 李志明,余晓露,徐二社,等. 渤海湾盆地东营凹陷有效烃源岩矿物组成特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 270-275.  
Li Zhiming, Yu Xiaolu, Xu Ershe, et al. The characteristics of mineral components for effective source rocks from Dongying Depression of Bohai Bay Basin and its significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 270-275.
- [6] 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 Guangxin, Wei Lihong. The significance of high-potential source rocks in Dongpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4): 185-188.
- [7] 母国妍,钟宇宁,刘宝,等. 湖相泥质烃源岩的定量评价方法及其应用[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 218-230.  
Mu Guoyan, Zhong Ningning, Liu Bao, et al. The quantitative evaluation method of lacustrine mudstone source rock and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 218-230.
- [8] 金强,朱光有,王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(4): 19-23.  
Jin Qiang, Zhu Guangyou, Wang Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(4): 19-23.
- [9] 阎存凤,袁剑英,陈启林,等. 柴达木盆地北缘东段大煤沟组一段优质烃源岩[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 49-53.  
Yan Cunfeng, Yuan Jianying, Chen Qilin, et al. Discovery of the high-quality source rock of the first member of Dameigou Formation in the east part of the northern Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 31(1): 49-53.
- [10] 高志勇,张水昌,李建军,等. 塔里木盆地东部中-上奥陶统却尔却克组海相碎屑岩中的有效烃源岩[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 32-40.  
Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Li Jianjun, et al. Hydrocarbon source rocks in marine clastic of the Middle-Upper Ordovician Queerquak Formation in the eastern Tarim Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 31(1): 32-40.
- [11] 贺训云,姚根顺,贺晓苏,等. 桂中坳陷泥盆系烃源岩发育环境及潜力评价[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 273-279.  
He Xunyun, Yao Genshun, He Xiaosu, et al. An evaluation of depositional environment and potential of Devonian source rocks in Guizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 31(2): 273-279.
- [12] Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. 2nd ed. New York: W. H. Freeman & Company, 1995.
- [13] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide (VOL I): biomarkers and isotopes in the environment and human history[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [14] 侯俊杰,张善文,肖建新,等. 陆相断陷湖盆优质烃源岩形成机制与成藏贡献——以济阳坳陷为例[M]. 北京:地质出版社, 2008.



- Hou Dujie, Zhang Shanwen, Xiao Jianxin, et al. Terrestrial fault depression high-potential source rocks formation and its contribution to petroleum accumulation; taking Jiyang Depression as an example[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [15] 黄飞, 辛茂安. SY/T 5735-1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京: 中国石油天然气集团公司, 1995.
- Huang Fei, Xin Mao'an. SY/T 5735-1995 Geochemical evaluation of terrestrial source rocks[S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1995.
- [16] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 65-88.
- Hou Qijun, Feng Zhiqiang, Feng Zihui. Terrestrial petroleum geology of the Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 65-88.
- [17] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 104-106.
- Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. Petroleum formation and occurrence of the Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 104-106.
- [18] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part III: modelling an open system[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995(12): 417-452.
- [19] England W A, Mackenzie A S, Munn D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface[J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327-347.
- [20] 卢双舫, 李娇娜, 刘绍军, 等. 松辽盆地生油门限重新厘定及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 166-173.
- Lu Shuangfang, Li Jiaona, Liu Shaojun, et al. Oil generation threshold depth of Songliao Basin: revision and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 166-173.
- [21] 杨万里, 高瑞祺, 郭庆福, 等. 松辽盆地陆相油气生成运移和聚集[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985: 166-168.
- Yang Wanli, Gao Ruiqi, Guo Qingfu, et al. Terrestrial petroleum migration and accumulation of the Songliao Basin[M]. Harbin: Heilongjiang Science Technology Press, 1985: 166-168.
- [22] Katz B J. Limitations of 'Rock-Eval' pyrolysis for typing organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1983, 4: 195-199.
- [23] Espitalie J, Deroo G, Marquis F. Rock-eval pyrolysis and its applications (part II)[J]. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, 1985, 40: 755-784.
- [24] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(3): 291-319.
- [25] 曾花森, 霍秋立, 张晓畅, 等. 应用岩石热解数据 S2-TOC 相关图进行烃源岩评价[J]. 地球化学, 2010, 39(6): 574-579.
- Zeng Huasen, Huo Qiuli, Zhang Xiaochang, et al. Source rock evaluation using the S2-TOC plot from Rock-Eval pyrolysis[J]. Geochimica, 2010, 39(6): 574-579.
- [26] 霍秋立, 曾花森, 任志高, 等. 松辽盆地北部青山口组有效源岩评价研究[R]. 大庆: 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 2009.
- Huo Qiuli, Zeng Huasen, Ren Zhigao, et al. Evaluation of the effective source rock of Qingshankou Formation in the northern Songliao Basin[R]. Daqing: Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., 2009.
- [27] 姜福杰, 姜振学, 庞雄奇, 等. 松辽盆地滨北地区中浅层烃源岩残留烃量及其地质意义[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(3): 193-196.
- Jiang Fujie, Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, et al. Residual hydrocarbon in the middle-shallow source rocks in the Binbei region of the Songliao Basin and its geologic implication[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(3): 193-196.

(收稿日期 2011-10-16 改回日期 2011-12-18 责任编辑 熊 英)

版权所有