

文章编号: 0253-9985(2011)02-0251-08

辽东湾地区深层烃源岩排烃特征及资源潜力

马行陟^{1 2} 庞雄奇³ 孟庆洋^{1 2} 姜福杰³

(1. 中国石油 勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油 盆地构造与油气成藏重点实验室 北京 100083;
3. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心 北京 102249)

摘要: 通过收集研究区深层烃源岩热解和有机碳等地化资料, 利用地质门限理论为基础的生烃潜力法, 对深层烃源岩的排烃特征进行了研究, 并结合聚集系数法预测其资源潜力。建立了3类烃源岩排烃模型, 其中, I型源岩最早进入排烃门限进行排烃, 排烃效率高于II型和III型源岩。沙河街组三段烃源岩早在沙河街组沉积末期开始排烃, 主要以排油为主, 累计排烃量为 43.30×10^8 t, 是研究区的主力烃源岩; 沙河街组二段烃源岩在东营组沉积时期开始排烃, 累计排烃量为 22.6×10^8 t。深层烃源岩的总排烃量为 65.90×10^8 t, 预测资源量为 21.06×10^8 t, 其中石油预测资源量为 17.12×10^8 t。研究结果表明, 辽东湾地区深层油气资源潜力巨大, 深层烃源岩以生油为主。辽西凹陷和辽中凹陷为两个富烃凹陷, 位于两个凹陷之间的辽西凸起, 具有双凹供烃之利, 是油气成藏的有利区。

关键词: 深层烃源岩; 排烃特征; 生烃潜力; 资源量; 辽东湾地区;

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Hydrocarbon expulsion characteristics and resource potential of deep source rocks in the Liaodong Bay

Ma Xingzhi^{1 2}, Pang Xiongqi³, Meng Qingyang^{1 2}, Jiang Fujie³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development PetroChina Beijing 100083 China;

2. Key Laboratory of Basin Structure & Hydrocarbon Accumulation of CNPC Beijing 100083 China;

3. Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on available geochemical data such as pyrolysis and total organic carbon (TOC), we studied the hydrocarbon expulsion characteristics of the deep source rocks by using the hydrocarbon-generation potential method, which is based on geological threshold theory. Three types of hydrocarbon expulsion models were established in this paper, with the type-I source rock expelling hydrocarbons earlier and more efficiently than the type-II and type-III. The Es³ source rocks, the main source rocks in Liaodong Bay, started expelling hydrocarbons (dominated by oil) at the end of Shahejie Formation and the total amount of hydrocarbons expelled is 4.33 billion tons. In comparison, the Es¹⁺² source rocks started expelling hydrocarbons during the deposition of the Dongying Formation, with a total expulsion amount of 2.26 billion tons. The total amount of hydrocarbons expelled from the deep source rocks is 6.59 billion tons. The resource volume is estimated to be 2.106 billion tons, of which oil is 1.712 billion tons. The study results indicate that the resource potential of the deep layers in Liaodong Bay is very huge and dominated by oil. The Liaoxi salient located between the Liaoxi and Liaozhong troughs both of which are hydrocarbon kitchens is very favorable for hydrocarbon accumulation.

收稿日期: 2010-10-02。

第一作者简介: 马行陟(1984—), 男, 博士研究生, 油气成藏与天然气地质。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司科研项目(SC06TJ-TQL-004)。

Key words: deep source rock , hydrocarbon expulsion characteristics , hydrocarbon-generation potential , resource volume , Liaodong Bay

辽东湾地区 ,自 1979 年开始实施钻探 LD20 - 3 构造以来 ,研究区内已钻探近 60 个构造 ,累计钻井 100 余口 ,获各级石油地质储量 12×10^8 t ,天然气储量 500×10^8 m³ ,占整个渤海海域的 36.7% ,共发现 12 个油气田和 30 多个含油气构造 ,尤其是 JZ25 - 1S 油田是我国海上又一个亿吨级的大油田 ,显示了巨大的勘探潜力^[1-5]。笔者拟利用热解、有机碳等地化数据等资料 ,以地质门限理论为基础 ,对研究区深层烃源岩排烃特征及资源潜力进行研究。

1 地质概况

辽东湾地区位于渤海湾盆地东北部 ,系指渤

海东北部海域 ,南界大致为辽东半岛南端(老铁山)与河北省秦皇岛市连线 ,面积为 2.6×10^4 km²。研究区为古近系覆盖区 ,总面积约 1.4×10^4 km²。构造上 ,辽东湾地区位于华北地台北部 ,北接辽河拗陷 ,东邻辽东隆起区 ,西界为山海关 - 北镇隆起 ,南连渤中拗陷 ,为渤海湾盆地的一个次级构造单元 ,即下辽河拗陷在海域的延伸部分。构造线呈北北西向 ,东西分带明显 ,呈辽西凹陷、辽西低凸起、辽中凹陷、辽东凸起及辽东凹陷三凹两凸的格局^[6-9](图 1)。自下而上发育古近系孔店组、沙河街组和东营组 ,新近系馆陶组、明化镇组和平原组 ,其中沙河街组(一、二段和三段)为主要的深层烃源岩层^[10-14]。

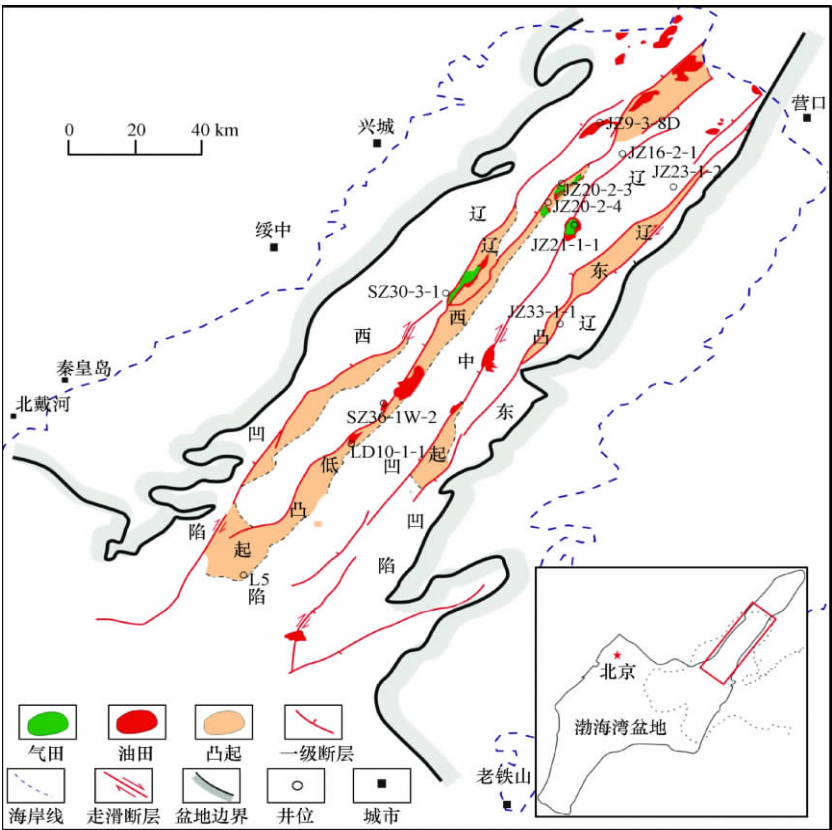


图 1 辽东湾地区构造分区
Fig. 1 Structural division of the Liaodong Bay

2 生烃潜力方法

含油气盆地烃源岩排烃特征评价方法有多种,如干酪根类型法^[15]、物理模拟实验法^[16-17]、有机质成熟度法^[18]、化学动力学法^[19]以及盆地模拟法^[20-21]等。这些方法都是在传统生烃门限的基础上建立起来的,忽略了未熟-低熟油气等的贡献,存在一定的弊端;同时,大多数方法需要收集比较多的参数或者通过数值模拟得到,影响因素多导致误差增大,评价过程也较为复杂。因此,研究中选取生烃潜力法进行评价。

生烃潜力法是最近10多年在排烃门限的概念上发展而来的一种方法^[22-25],理论基础是物质守恒定律,指烃源岩中的有机质在生、排烃前后的总质量不发生变化,即源岩中有机质的总量等于地史中以各种方式排出的烃类与仍残留在源岩中的烃类的总和。在地质历史时期中,同一套烃源岩具有类似的地质特征(如形成的沉积环境、有机质的组分和含量、经受的埋藏史和热演化史等),同一烃源岩层段现今在不同地点不同埋深下的样品特征就可以代表同一地点下不同时期的转化产物,通过不同地点的样品,建立起烃源岩在随埋深和热演化程度的演化剖面,因此,完全可以利用垂向上生烃潜力($S_1 + S_2$)的变化来研究烃源岩的排烃特征。按照物质平衡定律,生烃潜力由3部分组成:①尚未转化成烃的干酪根或残余有机质;②已生成并残留于源岩中的烃类;③已排出源岩的烃类。此方法中以生烃潜力指数 $[(S_1 + S_2) / TOC]$ 来表示烃源岩的生烃潜力。

源岩演化过程中,当源岩中生成的烃类没有满足自身的各种形式残留以前,其生烃潜力指数保持不变,称为原始生烃潜力指数(I_{HCO}),而使源岩生烃潜力减小的唯一原因就是源岩中有烃类排出。生烃潜力开始减小时对应的地质条件(深度、转化程度等)就是排烃门限,烃类排出后的任一阶段的生烃潜力指数称为剩余生烃潜力指数(I_{HCl}),其与原始生烃潜力指数(I_{HCO})之差就是排烃率(Q_e),即烃源岩达到排烃门限后单位有机碳排出的烃量。排烃量计算的主要步骤是:①收集研究区烃源岩层段的热解和TOC资料,建立烃源岩生烃潜力指数剖面,即 $(S_1 + S_2) / TOC$;②根据剖面的变化特征和趋势,确定排烃门限,计算不同埋深下

烃源岩的排烃率和进入排烃门限的烃源岩的累积厚度,即有效厚度;③求出排烃率和有效烃源岩厚度后,结合有机碳含量以及密度等数据,根据公式(1)计算排烃强度(E_{hc});④将排烃强度进行面积积分,即可得到排烃量。

$$E_{hc} = \int_{Z_0}^Z [q_e(Z) \cdot H \cdot \rho(Z) \cdot TOC] dZ \quad (1)$$

式中: Z 为埋深,m; Z_0 为排烃门限,m; $q_e(Z)$ 为单位质量有机碳的排烃率,mg/g; $\rho(Z)$ 为烃源岩密度,g/cm³;TOC为有机碳含量,%; H 为有效烃源岩厚度,m。

排烃速率(v_e)是源岩排烃特征的重要指标,是指地史过程中单位地史时间内排出的烃量,其大小可以反映出源岩在地史过程中的排油气高峰。实际地质条件下,源岩的排烃量主要由其埋深或地温决定,而不由地史时间决定的。其计算模型为:

$$v_e = \frac{\Delta Q_e}{\Delta t} \text{ 或 } \frac{\Delta Q_e}{\Delta Z} \quad (2)$$

式中: ΔQ_e 为源岩在地史期 Δt 内或埋深 ΔZ 过程中的排烃量,kg/m³; Δt 为某一地史时间,Ma; ΔZ 为源岩在地史期 Δt 内的埋深增大量,m。

3 深层烃源岩资源潜力评价

3.1 烃源岩排烃特征

根据生烃潜力法的原理和步骤,收集研究区61余口探井深层烃源岩的热解和TOC数据共512个,建立深层3类烃源岩(沙河街组I型源岩、沙河街组II型源岩和沙河街组III型源岩)排烃模式图(图2),分析了辽东湾深层烃源岩的排烃特征。

根据建立的深层烃源岩排烃地质模式,I型源岩最早进入排烃门限,进行排烃作用,其排烃门限深度在2 800 m,其次为II型源岩其排烃门限为2 920 m,III型源岩排烃门限为3 000 m。此外,I型烃源岩在进入排烃门限后最早达到排烃高峰,其对应的高峰深度为3 800 m,排烃效率高达78%,相比之下II型烃源岩达到排烃高峰的深度则是4 050 m,III型烃源岩更为迟缓,在4 200 m时才达到排烃高峰,且排烃效率最大仅为20%,从排烃的角度验证了I型烃源岩对于油气勘探更为有益(表1)。

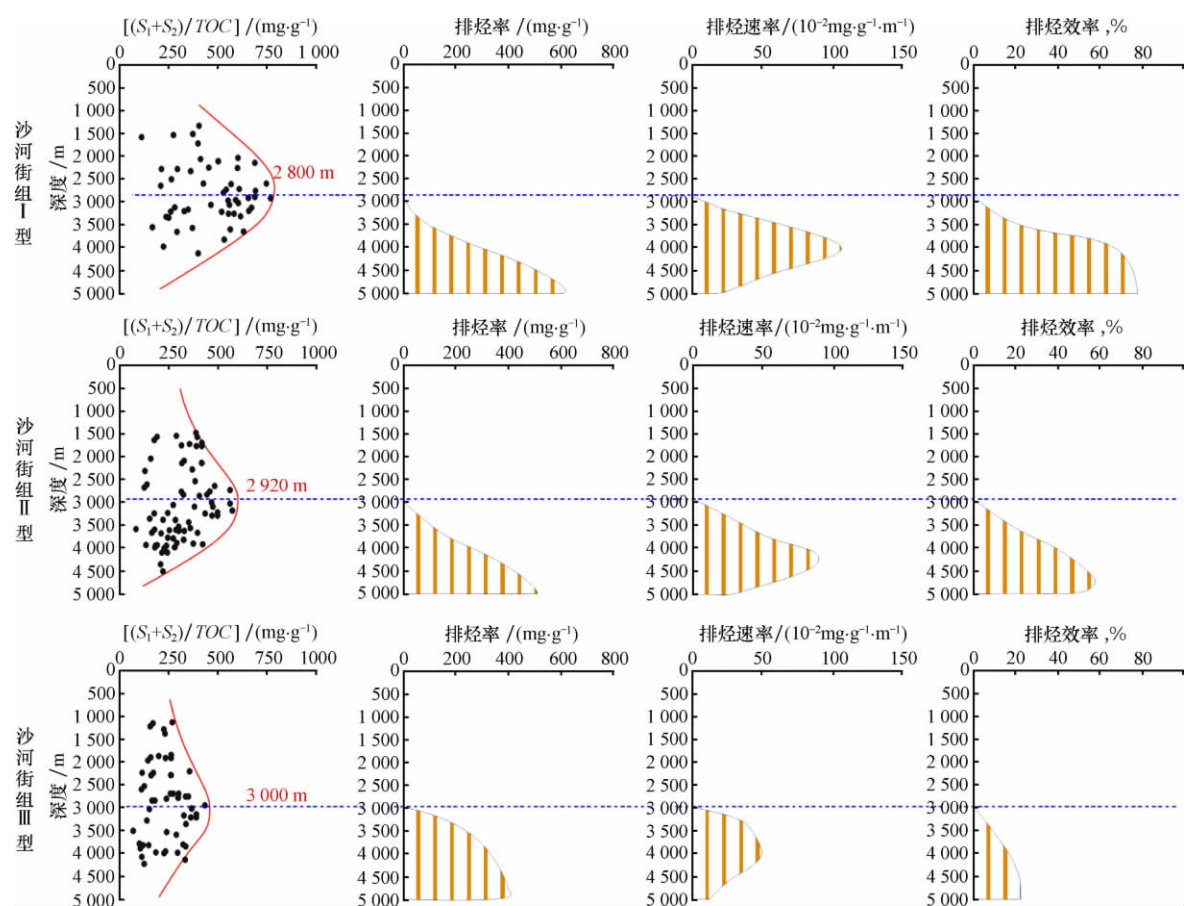


图 2 辽东湾地区深层烃源岩排烃模式

Fig. 2 Hydrocarbon expulsion models of deep source rocks in the Liaodong Bay

表 1 辽东湾地区深层源岩排烃特征统计

Table 1 Statistics of hydrocarbon expulsion characteristics of deep source rocks in the Liaodong Bay

层位	母质类型	排烃门限/m	最大排烃率/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	排烃高峰深度/m	最大排烃效率/%
沙河街组	I 型	2 800	650	3 800	78
	II 型	2 920	520	4 050	56
	III 型	3 000	370	4 200	20

在深层烃源岩排烃模式的基础上得到深层有效烃源岩的厚度及不同深度不同类型源岩的排烃率,结合 TOC 平面分布图,利用公式(1)对烃源岩的现今排烃强度进行了计算(图 3、图 4)。

研究表明,辽中凹陷和辽西凹陷的北洼为主要的排烃中心。两套烃源岩的平面排烃分布各有其特征:沙河街组一、二段的排烃强度普遍不高,最大值刚达到 $120 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,总体排烃范围有限,主要以辽中凹陷为主,其原因是受有效烃源岩不太发育的限制,有效烃源岩的厚度和分布范围小。沙河街组三段有效烃源岩普遍发育,排烃

范围和强度都得到了扩展,辽西凹陷沙河街组三段源岩基本上都进入了排烃的范围,尽管范围不如辽中凹陷大,但最大排烃强度却出现在辽西凹陷北洼,达到了 $270 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,预示着辽西凹陷是一个“小而肥”的富生烃凹陷。

3.2 烃源岩资源潜力

利用排烃强度进行面积积分可得地史时期各源岩层段的排烃量(图 5)。研究区沙河街组一、二段烃源岩在东营组沉积时期才有油气排出,推测该段源岩应在东营组三段沉积时期开始排烃,到馆陶组和明化镇组沉积时期达到排烃高峰;而沙河街组三段烃源岩在沙河街组一、二段沉积时期已满足排烃门限排出烃类,最初出现排烃的地区在辽中凹陷的北部深洼。到东营组沉积时期辽西凹陷北部也开始排烃,其排烃强度迅速增加,并在馆陶组沉积时期排烃强度的最高值超过辽中凹陷的北洼,成为沙河街组三段烃源岩最主要的排烃中心。在馆陶组沉积时期,辽西凹陷的中洼也

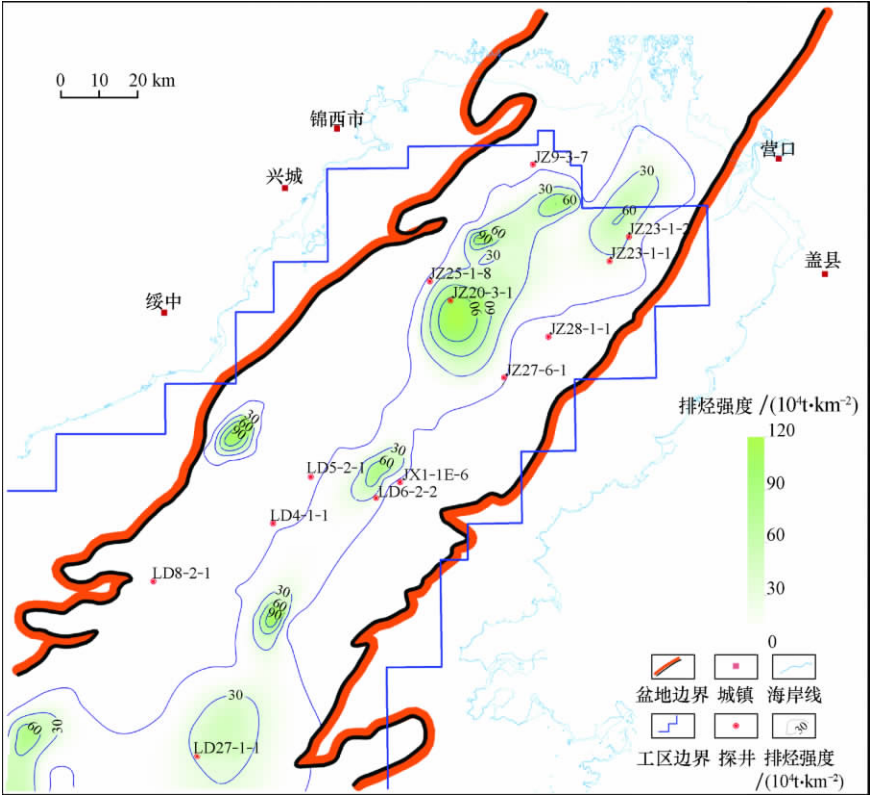


图 3 辽东湾地区 E_{s1-2} 现今排烃强度

Fig. 3 Present hydrocarbon expulsion intensity of E_{s1-2} source rocks in the Liaodong Bay

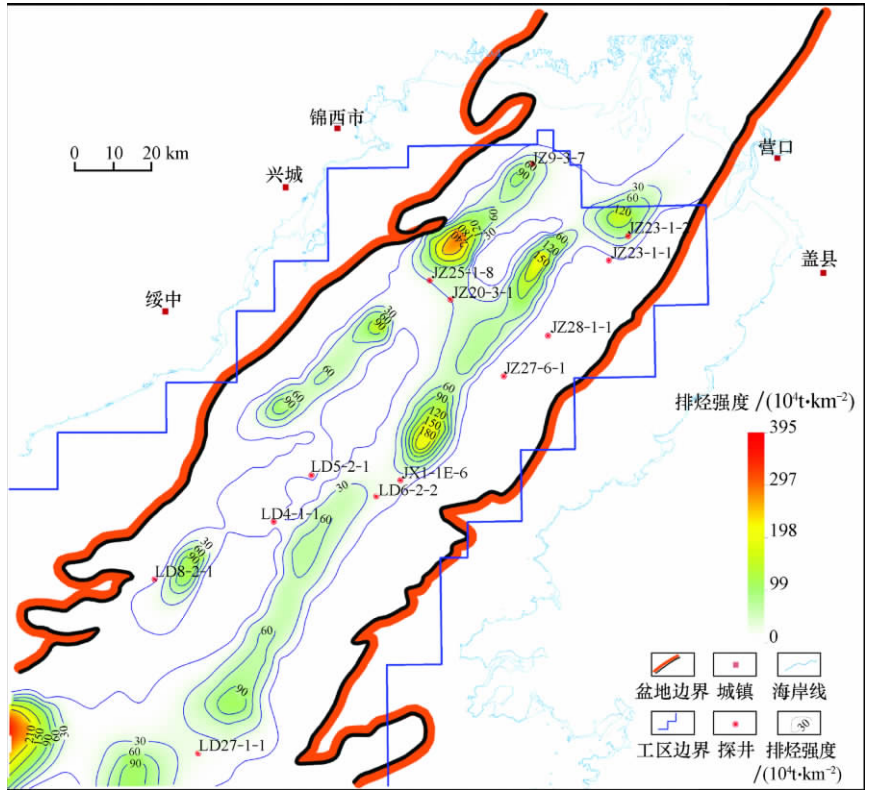


图 4 辽东湾地区 E_{s3} 现今排烃强度

Fig. 4 Present hydrocarbon expulsion intensity of E_{s3} source rocks in the Liaodong Bay

开始排烃,此时辽中凹陷的中洼达到排烃最大值,成为辽东湾地区又一个重要的排烃中心。在各个地史时期中,馆陶组沉积时期的总排烃量达到 26.0×10^8 t,占排烃总量的 39.45%,为

各个时期排烃量最高;明化镇组沉积时期的总排烃量为 18.3×10^8 t,占排烃总量的 27.77%,仅次于馆陶组沉积时期;东营组沉积时期的总排烃量为 15.2×10^8 t,占排烃总量的 23.07%,

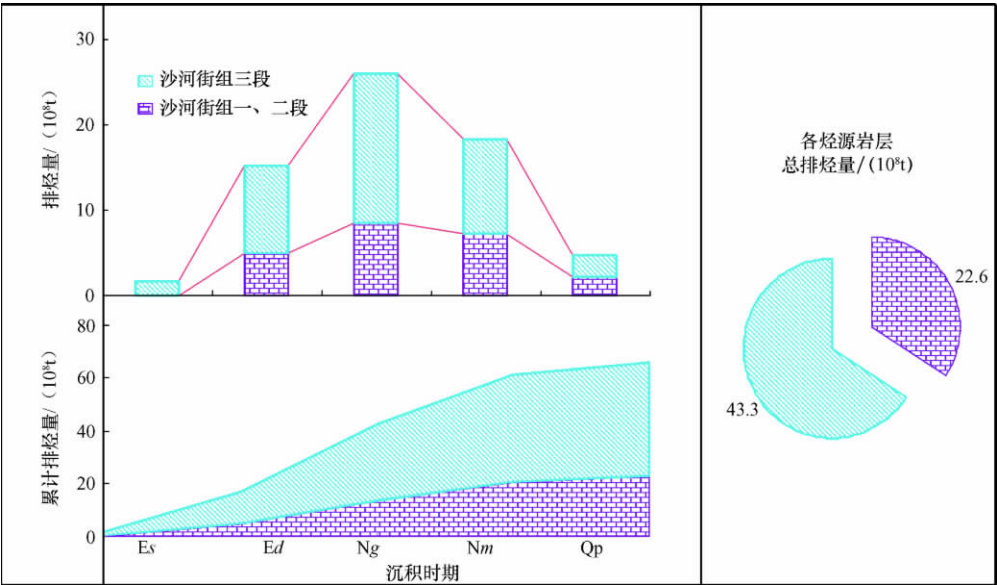


图 5 辽东湾地区深层烃源岩排烃综合评价

Fig. 5 Comprehensive evaluation of hydrocarbon expulsion for deep source rocks in the Liaodong Bay

低于明化镇组沉积时期;沙河街组沉积时期仅三段的烃源岩有排烃,且量小,为 1.7×10^8 t,占排烃总量的 2.58%。深层烃源岩在东营组沉积时期开始大量排烃,排烃时期较晚,但排烃强度大,范围广,在馆陶组和明化镇组沉积时期烃源岩达到排烃的高峰,排出的油气可以进入早期已经形成的圈闭中,有利于形成油气藏。

辽东湾地区深层烃源岩现今累计排烃量分别为:沙河街组一、二段为 22.6×10^8 t 和三段为 43.3×10^8 t,合计排烃量为 65.9×10^8 t。根据有机质的油气发生率物理模拟实验^[20],求出排油占排烃的百分比随 R_o 的变化规律(图 6),进而求出各源岩层的排油量和排气量(表 2)。结果表明,深层烃源岩排油能力大于排气能力,以后的勘探方向应以找油为先。

根据油气聚集系数的研究^[21],分别求取了辽东湾不同构造带油气的聚集系数,最后得到主要构造带预测资源量(表 3)。辽东湾总的资源量为 21.06×10^8 t,其中石油预测资源量为 17.12×10^8 t,预测天然气资源量为 3.94×10^{11} m³。辽西凹陷和

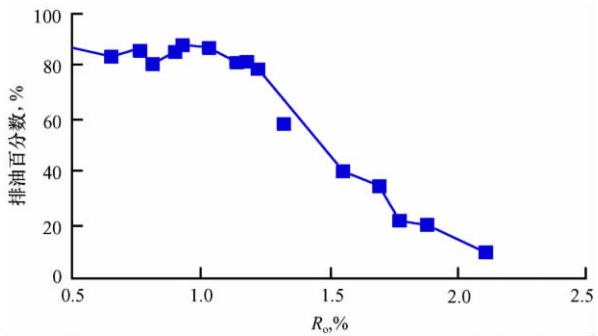


图 6 松辽盆地烃源岩排油量与排烃量之比随 R_o 的变化规律^①

Fig. 6 R_o vs. ratio of discharged oil and total hydrocarbon from source rocks in the Songliao basin

表 2 辽东湾地区深层烃源岩排油气量

Table 2 Amount of oil and gas discharged from deep source rocks of the Liaodong Bay

层段	排烃量/ (10^8 t)	R_o 均 值, %	排油百分数, %	排油量/ (10^8 t)	排气量/ (10^{11} m ³)
Es ¹⁻²	22.6	0.6	82	18.53	4.07
Es ³	43.3	0.7	81	35.07	8.23

① 卢双航,付广. 松辽盆地滨北地区烃源岩条件研究及资源量预测[R]. 大庆石油学院, 2004.

表 3 辽东湾地区主要构造带资源量分布

Table 3 Resource volumes of main structural belts in the Liaodong Bay

层位	辽西凹陷			辽中凹陷			辽东凹陷		
	聚集系数	预测石油资源量/ (10 ⁸ t)	预测天然气资源量/ (10 ¹¹ m ³)	聚集系数	预测石油资源量/ (10 ⁸ t)	预测天然气资源量/ (10 ¹¹ m ³)	聚集系数	预测石油资源量/ (10 ⁸ t)	预测天然气资源量/ (10 ¹¹ m ³)
E _s ¹⁻²	0.33	1.17	0.32	0.31	4.44	0.79	0.32	0.21	0.18
E _s ³	0.34	4.31	0.94	0.31	6.26	1.36	0.33	0.73	0.35

辽中凹陷的资源量占总量的 90% 以上,为油气成藏提供了充足的物质基础。两个凹陷之间的辽西凸起,有双凹供烃之利,且近几年的钻井都有良好的油气显示,展示了其巨大的勘探前景,是今后勘探的重点地区。

4 结论

1) 辽东湾地区深层 3 类烃源岩的排烃门限分别是: I 型源岩排烃门限深度为 2 800 m,其次为 II 型源岩排烃门限为 2 920 m,III 型为 3 000 m。I 型源岩的排烃率最高为 78%,而 III 型源岩仅为 20%。I 型源岩排烃特征明显优于 III 型源岩。

2) 沙河街组一、二段在东营组沉积时期开始排烃,三段则在沙河街组沉积末期排烃,两者均在馆陶组和明化镇组沉积时期达到排烃高峰。深层烃源岩属于晚期排烃,有利于油气藏的形成。

3) 沙河街组一、二段现今累计排烃量为 22.6 × 10⁸ t,排油量为 18.53 × 10⁸ t;三段现今累计排烃量为 43.3 × 10⁸ t,排油量为 35.07 × 10⁸ t。辽东湾总的资源量为 21.06 × 10⁸ t,其中石油预测资源量为 17.12 × 10⁸ t,天然气预测资源量为 3.94 × 10¹¹ m³,显示了辽东湾深层良好的勘探前景。

参 考 文 献

[1] 田立新,武丽,姜振学,等. 辽东湾凹陷石油运聚成藏过程中运载层残留油量计算关键参数的求取[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 405-410.

Tian Lixin, Wu Li, Jiang Zhenxue, et al. Method for obtaining key parameters for calculating residual oil amount in carrier beds after oil migration and accumulation in the Liaodong Bay Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 405-410.

[2] 池英柳. 渤海新生代含油气系统基本特征与油气分布规律[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1): 3-10.

Chi Yingliu. Basic characteristics and hydrocarbon distribution in Cenozoic petroleum systems, Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas(Geology) 2001, 15(1): 3-10.

[3] 龚再升. 渤海海域将成为我国东部石油稳产的重要基地[J]. 石油科技论坛, 2000, 4: 17-25.

Gong Zaisheng. Bohai sea will become stable and important petroleum base in eastern of China [J]. Oil Forum, 2000, 4: 17-25.

[4] 李潍莲,刘震,刘俊榜,等. 辽东湾地区辽西低凸起油气田成藏地质条件的差异[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 664-670.

Li Weilian, Liu Zhen, Liu Junbang, et al. Differences of geological conditions of hydrocarbon accumulation among fields in the Liaoxi Low Uplift, the Liaodong Bay [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 664-670.

[5] 张功成. 渤海海域构造格局与富生烃凹陷分布[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 93-99.

Zhang Gongcheng. Tectonic framework and prolific hydrocarbon depressions in Bohai Bay [J]. China Offshore Oil and Gas(Geology) 2000, 14(2): 93-99.

[6] 翟光明. 中国石油地质志(卷十六) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 83-85.

Zhai Guangming. Petroleum Geology of China(No. 16) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 83-85.

[7] 漆家福,陈发景. 辽东湾-下辽河裂陷盆地的构造样式[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 272-282.

Qi Jiafu, Chen Fajing. Structural style in Liaodongwan-Xialiaohe basin [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 272-282.

[8] 金尚柱,孙洪斌,谢文彦,等. 辽东湾北部油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 2-3.

Jin Shangzhu, Sun Hongbin, Xie Wenyan, et al. Petroleum geology of the North Liaodong Bay [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 2-3.

[9] 孙红军. 中新世代辽河盆地区域应力场变化及其成因[J]. 古地理学报, 2002, 4(4): 61-69.

Sun Hongjun. Variation and genesis of regional stress field of Liaohe Basin in Meso-Cenozoic [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4): 61-69.

[10] 董艳蕾,朱筱敏,李德江,等. 渤海湾盆地辽东湾地区古近系地震相研究[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 554-563.

Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Li Dejiang, et al. Seismic facies of

- paleogene in Liaodong Bay ,Bohai Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2007 25(4): 554 – 563.
- [11] 朱筱敏,董艳蕾,杨俊生,等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学* 2008, 38: 1 – 10.
- Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Yang Junsheng, et al. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* 2008 38: 1 – 10.
- [12] 陈清华,刘泽容. 辽东湾盆地南部第三系构造岩相分析[J]. *石油大学学报(自然科学版)* 1994 18(2): 9 – 13.
- Chen Qinghua, Liu Zerong. Teco-facies analysis of lower series in the southern part of Liaodong Bay Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Nature Science)* 1994 18(2): 9 – 13.
- [13] 徐长贵,许效松. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析[J]. *古地理学报*, 2005 7(4): 449 – 459.
- Xu Changgui, Xu Xiaosong. Structural and sequence stratigraphic frameworks and palaeogeography of the Paleogene in central-southern Liaoxi Sag, Liaodongwan Bay Area [J]. *Journal of Palaeogeography* 2005 7(4): 449 – 459.
- [14] 朱筱敏,刘泽荣,赵景龙,等. 辽东湾南部第三系地震地层学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1991 10(4): 10 – 20.
- Zhu Xiaomin, Liu Zerong, Zhao Jinglong. On seismic stratigraphy of Eocene in southern Liaodong Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 1991 10(4): 10 – 20.
- [15] Pepper A S, 王世谦,刘成根. 定量评价烃源岩排烃特性的一种新办法[J]. *天然气勘探与开发* 1995 18(2): 12 – 26.
- Pepper A S, Wang Shiqian, Liu Chenggen. A new method to quantitative assessment source rock expulsion characteristics [J]. *Natural Gas Exploration & Development* 1995 18(2): 12 – 26.
- [16] Sweeney J J, Braun R L, Burnham A K et al. Chemical kinetic model of hydrocarbon generation, expulsion and destruction applied to the Maracaibo Basin, Venezuela [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(10): 1515 – 1532.
- [17] Nakayama K. Hydrocarbon-expulsion model and its application to Niigata area, Japan [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(7): 810 – 821.
- [18] 张文正,杨华,李剑锋,等. 论鄂尔多斯盆地长-7 段优质油源岩在低渗油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. *石油勘探与开发* 2006 33(3): 289 – 293.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang-7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation—hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2006 33(3): 289 – 293.
- [19] 卢双舫,徐立恒,申家年,等. 富台油田成藏期与生排烃期的匹配关系[J]. *新疆石油地质* 2006 27(3): 270 – 272.
- Lu Shuangfang, Xu Liheng, Shen Jianian, et al. Relationship between hydrocarbon accumulation stage and hydrocarbon generation and expulsion stage in Futai Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology* 2006 27(3): 270 – 272.
- [20] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 107 – 132.
- Shi Guangren. Numerical methods of petroliferous basin modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 107 – 132.
- [21] Burrus J, Wolf S, Osadetz K et al. Physical and numerical modelling constraints on oil expulsion and accumulation in the Bakken and Lodgepole petroleum systems of the Williston Basin (Canada-USA) [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1996 44(3): 429 – 445.
- [22] 周杰,庞雄奇. 一种生、排烃量计算方法探讨与应用[J]. *石油勘探与开发* 2002 29(1): 24 – 27.
- Zhou Jie, Pang Xiongqi. A method for calculating the quantity of hydrocarbon generation and expulsion [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2002 29(1): 24 – 27.
- [23] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 石油工业出版社, 1995: 22 – 73.
- Pang Xiongqi. Theory and application of hydrocarbon expulsion threshold control oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 22 – 73.
- [24] 庞雄奇,陈章明. 排油气门限的基本概念、研究意义与应用[J]. *现代地质* 1997 11(4): 510 – 520.
- Pang Xiongqi, Chen Zhangming. Basic concept of hydrocarbon expulsion threshold and its research significance and application [J]. *Geoscience* 1997 11(4): 510 – 520.
- [25] 马中振,庞雄奇,吴河勇,等. 用生烃潜力法研究松辽盆地北部中浅层烃源岩资源潜力[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)* 2009 33(4): 27 – 31.
- Ma Zhongzhen, Pang Xiongqi, Wu Heyong. Research on resource potential of middle-shallow source rocks of the northern part of Songliao Basin with hydrocarbon-generation potential method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Nature Science)* 2009 33(4): 27 – 31.

(编辑 张亚雄)