

东营凹陷油气成藏体系的划分及定量评价

姜福杰^{1,2}, 姜振学^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}

1. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

2. 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

摘要: 油气成藏体系作为油气评价单元的一种全新的研究思路, 与勘探目标结合更加紧密, 油气成藏门限从定量的角度阐述油气藏的形成及分布规律, 尤其对于高勘探程度的地区而言, 剩余资源的预测更为准确。在对东营凹陷油气成藏体系划分的基础上, 利用油气成藏门限理论对各成藏体系进行了定量评价。结果表明: 东营凹陷所划分的8个成藏体系都进入了成藏门限和资源门限, 凹陷总剩余资源量为 17.03×10^8 t; 其中, 成藏体系Ⅷ、Ⅰ的剩余资源最大, 分别为 4.41×10^8 t、 3.10×10^8 t; 而成藏体系Ⅵ、Ⅴ最小, 分别为 0.90×10^8 t、 0.22×10^8 t; 其余成藏体系介于其间。可知, 成藏体系Ⅷ、Ⅰ为最有利勘探潜力区。

关键词: 东营凹陷; 油气成藏体系; 油气成藏门限; 定量评价。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2008)05-0651-10

收稿日期: 2008-01-24

Division and Quantitative Evaluation of Petroleum Accumulation System in Dongying Sag

JIANG Fu-jie^{1,2}, JIANG Zhen-xue^{1,2}, PANG Xiong-qi^{1,2}

1. Basin and Reservoir Research Center of China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Education Ministry, Beijing 102249, China

Abstract: The theory of oil accumulation threshold describes the formation and distribution of reservoirs quantitatively, which is better than other theories in predicting undiscovered resources in mature exploration area. In this article, Dongying sag was divided into eight petroleum accumulation system, and they were quantitatively estimated by the the theory of oil accumulation threshold. The results shows that all of them have entered their thresholds of oil accumulation and resources. The total resources undiscovered is 17.03×10^8 t in Dongying sag. Ⅷ and Ⅰ petroleum accumulation systems have 4.41×10^8 t and 3.10×10^8 t undiscovered resources, respectively, which are much more than rest petroleum accumulation systems. Ⅵ and Ⅴ petroleum accumulation systems have the least undiscovered resources 0.90×10^8 t and 0.22×10^8 t, respectively. So Ⅷ and Ⅰ petroleum accumulation systems are the potential areas to explore.

Key words: Dongying sag; petroleum accumulation system; oil accumulation threshold; quantitative evaluation.

油气属于流体矿产, 其自生成至运聚成藏是一个复杂的地质过程, 如何准确地掌握这一过程并最终预测油气资源远景, 一直是难点和热点。我国石油地质学家在长期的找油实践中建立了具有中国特色的陆相石油地质理论(胡朝元, 1982; 胡见义等, 1986; 刘兴材等, 1996; 林畅松等, 2000)和资源预测

方法(赵旭东, 1986; 宋芝祥, 1987; 武守诚, 1994), 对陆相盆地油气藏的形成及分布规律和资源评价进行了卓有成效的探索, 总体而言, 这些研究仍以定性为主, 造成评价结果粗糙而且可靠性低。而对于油气评价单元来讲, 国内外学者也提出不少理论和划分方案(胡朝元, 1982; Magoon and Dow, 1994), 但是

众多理论存在的一个共同问题就是划分方案与勘探目标衔接不够紧密,导致评价结果应用性降低.因此本文尝试从定量研究的角度出发,在油气成藏体系(庞雄奇等,2003a)划分的基础之上,利用油气成藏门限理论(庞雄奇等,2000,2003b),对东营凹陷的油气资源潜力和分布规律进行定量研究.

1 地质背景

东营凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷南部的第三系富油气凹陷,是渤海湾裂谷系内典型的开阔型箕状凹陷.凹陷主要由利津、博兴、牛庄和民丰 4 个次级洼陷和中央隆起带、石村断裂带、北部陡坡带、南部斜坡带等若干个二级构造带组成,面积 5 700 km² (图 1). 东营凹陷以下第三系为主要生储油气岩系.源岩为 E_{s1} 和 E_{s3}, 储集层 E_{s5} 和 E_{s2}, 区域性盖层主

要为 E_{s1}. 东营凹陷成油条件好、油藏类型多、储量丰度大,历经 30 多年的勘探,累计探明石油地质储量 20.02×10⁸ t,控制石油地质储量 1.67×10⁸ t,预测石油地质储量 3.14×10⁸ t;探明天然气 142.73×10⁸ m³,属于中高勘探区,因此合理而准确的预测剩余油气资源及其分布规律,对于指导今后的油气勘探至关重要.

2 油气成藏体系的划分

2.1 概述

油气成藏体系(成藏体系)是指地表以下油气成藏的自然体系,它包括了形成油气藏的一切必要元素(要素),如烃源体、输导体和圈闭以及这些元素之间有效的配置结果,油气成藏体系必须具备这样的结果,即能够产生任何单一元素所不具备的功能——形成油气藏(庞雄奇等,2003a). 其与含油气系统是两个完全不同的概念(Magoon and Dow, 1994). 两者最明显的差异是分析问题的视角不同:含油气系统强调烃源岩的形成、分布与演化,以烃源岩形成、分布与演化规律为主线进行系统分析,而油气成藏体系的着眼点在于以聚集单元为中心,这样就与勘探目标紧密地结合在一起(图 2).

2.2 划分方法及结果

油气成藏体系的划分方法与用分割槽理论划分油气运聚单元(姜振学和付广,1994,姜振学等,1997)相似,首先在成藏组合划分的基础之上,将运载层顶面(盖层地面)流体势场分成几个油气运移方向和运聚区,并将其与构造或圈闭的形成演化相结合,每一个方向所涵盖的生油岩与其上方的圈闭组

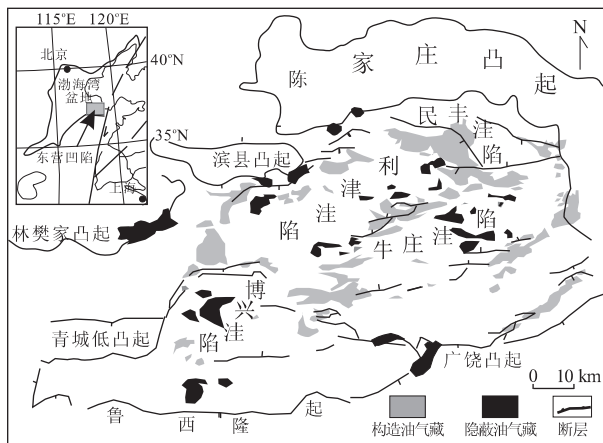


图 1 东营凹陷构造位置及油气藏分布

Fig. 1 Sketch map showing the structure position and oil and gas distribution in Dongying sag

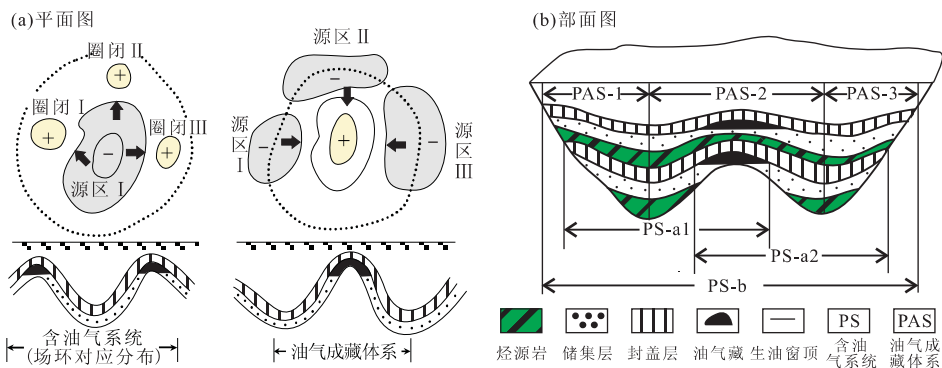


图 2 含油气系统与油气成藏体系概念的区别和联系(庞雄奇等,2003a)

Fig. 2 Diagrams showing differences and relations between petroleum system and petroleum accumulation system

合,就构成一个油气成藏体系。

通过对东营凹陷沙一段底面流体势的计算,并进行归一化处理^①,结合油气成藏体系划分原则,将东营凹陷划分为 8 个油气成藏体系(图 3),分别为:东营中央背斜带油气成藏体系(I)、王家岗—八面河油气

成藏体系(II)、乐安—纯化鼻状构造油气成藏体系(III)、博兴洼陷南坡油气成藏体系(IV)、青城低凸起北坡油气成藏体系(V)、平方王—大芦湖油气成藏体系(VI)、滨县凸起南坡油气成藏体系(VII)、东营凹陷北坡油气成藏体系(VIII)。各成藏体系的主要特征见表 1。

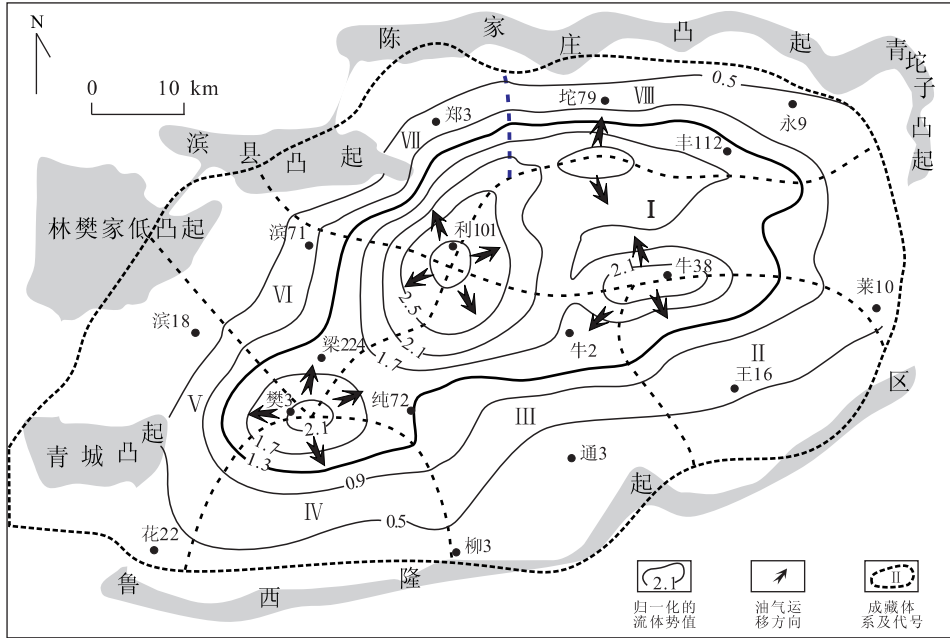


图 3 东营凹陷油气成藏体系划分

Fig. 3 Diagram of division of petroleum accumulation system in Dongying sag

表 1 东营凹陷沙河街组油气成藏体系主要特征

Table 1 The main characters of petroleum accumulation system of Shahejie Formation, Dongying sag

成藏体系 代号	成藏体系 名称	面积 (km ²)	油气来源	主要油田	含油层系	运移通道	运移方式	油藏类型
I	东营中央背斜带	902	利津、牛庄、民丰	东辛、现河、史南、新立村	E _{s2}	断层、砂体	垂向、侧向	构造
II	王家岗—八面河	653	牛庄	王家岗、八面河、牛庄、广利	E _{s2}	断层、砂体	垂向、侧向	构造、岩性
III	乐安—纯化鼻状构造	912	利津、牛庄、博兴	纯化、梁家楼、乐安、乔庄	E _{s2}	断层、砂体	侧向	构造、岩性、地层
IV	博兴洼陷南坡	645	博兴	正理庄、大芦湖、金家和博兴	E _{s2}	不整合、砂体	侧向	地层、岩性
V	青城低凸起北坡	604	博兴	高青、花沟、平南	E _{s2}	砂体、断层	侧向	构造、构造-岩性
VI	平方王—大芦湖	618	利津、博兴	平方王、小营、滨南、尚店、林樊家	E _{s2}	砂体、断层、不整合	侧向	构造、地层
VII	滨县凸起南坡	640	利津	利津、郝家、宁海、王庄、郑家、单家寺	E _{s2}	断层、砂体、不整合	垂向	构造、地层
VIII	东营凹陷北坡	726	利津、民丰	胜坨、宁海、永安镇、盐家	E _{s2}	砂体、断层	垂向	构造、岩性

①姜振学, 李素梅, 2005. 东营凹陷沙四上亚段源岩排烃特征数值模拟与评价. 内部报告.

3 油气成藏门限概述

3.1 基本原理

油气自烃源岩生成后到开始聚集成藏的过程中,要发生大量的损耗.成藏门限是指油气成藏体系内形成具有工业价值油气藏的过程中所必须耗散的最小烃量.从地史含义上来讲,成藏门限系指油气开始聚集成藏的临界地质条件,满足这一条件,油气开始富集成藏(姜振学等,2002;庞雄奇,2003b).油气的损耗依先后可分为烃源岩残留、储层滞留、盖前排失、围岩吸附、水溶流失和扩散损失,满足这些损耗后,油气进入成藏门限,聚集成藏;聚集的油气满足后期的构造破坏、无价值聚集的损失后,进入资源门限,这部分烃量称为远景资源量,包括特殊资源量和常规资源量两个部分.其地质模型和概念模型如图4.

3.2 各种损耗烃量的计算模型和判别模型

由前述可知,油气自生成至运聚成藏要经历一系列的门槛,也就意味着在每一门槛之中都存在着一定的油气损耗.关于各种损耗烃量的计算模型和公式推导前人已有专门的文献讨论(庞雄奇等,2000,2003a;姜振学等,2002),这里仅作简要概述.

3.2.1 成藏门限判别及其损耗烃量的计算 油气生成后,只有满足源岩残留(Q_{rm})、储层滞留(Q_{rs})、盖前排失(Q_{bc})、水溶流失(Q_{wl})和扩散损失(Q_{ed})等各种损耗后,才可以进入成藏门限,油气成藏门限的计算模型和判别模型分别如式(1)、式(2):

$$\text{油气成藏门限} = \min \sum_{i=1}^n Ql_i = Q_{rm} + Q_{rs} + Q_{bc} + Q_{ed} + Q_{wl}, \quad (1)$$

式(1)中: Ql_i 代表第*i*个条件形成的损耗烃量, t ;其他符号的含义如图4所示.聚烃门限的判别标准为:

$$Q_{ac} = Q_p - \sum_{i=1}^n Ql_i \begin{cases} < 0 & \text{未进成藏门限} \\ = 0 & \text{处于成藏门限} \\ > 0 & \text{已进入成藏门限} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 Q_{ac} 为可供聚集烃量; Q_p 为源岩生成烃量, t .

(1)源岩残留烃量模拟.源岩残留烃主要包括源岩内岩石吸附烃、源岩孔隙水溶残留烃、源岩内油溶残留气.基于实验成果和对烃源岩大量残留烃量资料的统计分析,建立了烃源岩液态烃残留临界饱和量和、吸附烃(气)残留临界饱和量、水溶烃(气)残留临界饱和量、油溶烃(气)残留临界饱和量的计算公式.

①源岩残留油量计算模型:

$$Q_{rm} = \rho_0 \cdot (\phi_n + \Delta\phi) \cdot S_{om}, \quad (3)$$

$$S_{om} = f(C\%) \cdot \frac{1}{1 - B_k} \cdot e^{-\frac{\phi}{D}(R\% - R')^2}, \quad (4)$$

$$f(C\%) = A_0 + A_1 \cdot C\% + A_2 \cdot (C\%)^2, \quad (5)$$

$$B_k = 0.81 - 0.65R\% + 0.18(R\%)^2, \quad (6)$$

式(3)~(6)中: Q_{rm} 为单位体积烃源岩残留液态烃临界饱和量,kg; ϕ_n 、 $\Delta\phi$ 为烃源岩正常压实的孔隙度,欠压实时的剩余孔隙度,%; S_{om} 为烃源岩残留烃饱和量; $f(C\%)$ 为烃源岩残留烃饱和量与有机母质丰度的相关因子; B_k 为轻烃组分(C_{5-14})占液态烃总量(C_{5+})的百分数,%; $C\%$ 、 $R\%$ 为烃源岩中有机母质丰度、镜质体反射率; ρ_0 为烃源岩中残留液态烃密度,g/cm³; D 、 R' 、 A_0 、 A_1 、 A_2 为与研究区烃源岩残留特征有关的待定常数,通过对烃源岩实测残

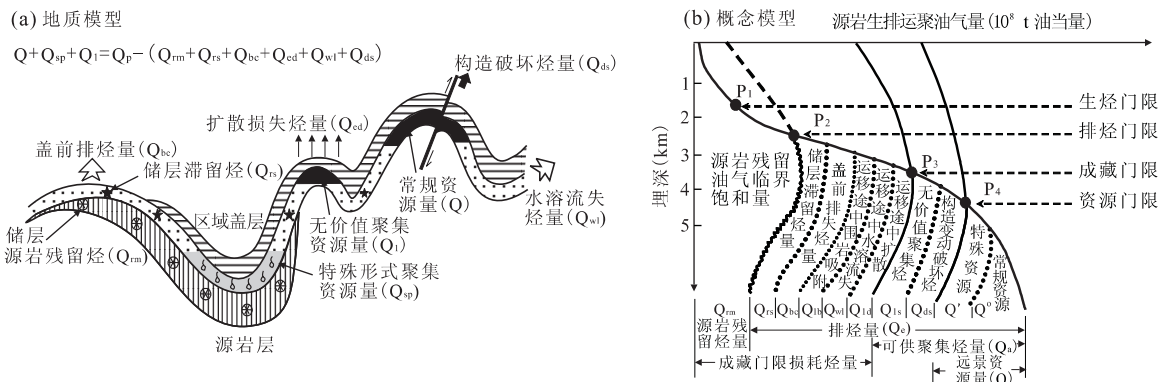


图4 物质平衡法评价油气资源地质模型和概念模型(庞雄奇等,2002b)

Fig. 4 Geological model and conceptual model of evaluating petroleum resources based on the law of conservation of mass

留烃量进行统计和模拟计算确定。

②源岩残留天然气量计算模型:

(a)岩石吸附残留天然气量(Q_{bg})计算模型:

$$Q_{bi} = K_i \cdot \rho_r \cdot K(C\%) \cdot \frac{K(R\%)}{K_w} \cdot \frac{a \cdot b \cdot p}{1 + b_i \cdot p} \cdot e^{-n(T-20)} \quad (7)$$

式(7)中: $n = \frac{0.02}{0.993 + 0.0017p}$;

$$K(R\%) = 0.836 + 0.68R\% + 0.498(R\%)^2;$$

$$K(C\%) = A_0 + A_1 \cdot C\%;$$

$$K_w = 1 + 0.445e^{1+P};$$

$$K_i = \begin{cases} 0.079 \\ 0.00478 \\ 0.0066 \\ 0.0038 \end{cases} \quad a_i = \begin{cases} 0.117 \\ 0.723 \\ 1.309 \\ 1.833 \end{cases} \quad b_i = \begin{cases} 5.32 \\ 0.15P + 0.30 \\ 3.04P + 0.6858 \\ 8.688P + 1.065 \end{cases}$$

$P, C\%, R\%, K_w, \rho_r$ 分别表示压力(Pa)、有机碳含量(%), 镜质体反射率(%), 泥岩的干湿性和密度(g/cm^3); i 分别代表甲烷、乙烷、丙烷、丁烷 4 种气态烃组分; 子选手 K_i 等为与烃组分吸附特性有关的常数。

(b)水溶残留天然气量(Q_{wg})计算模型:

$$Q_{wi} = q_{wi} \cdot \phi \cdot (1 - S_o) \quad (8)$$

式(8)中: Q_{wi} 为岩石中 i 组分烃的水溶残留量, m^3/m^3 ; q_{wi} 为 $1 m^3$ 水中 i 组分烃的溶解量, m^3/m^3 ; ϕ 为岩石的孔隙度, 小数; S_o 为岩石孔隙中的液态烃残留饱和度和, 小数。

(c)油溶残留天然气量(Q_{og})计算模型:

$$Q_{og} = q_{og} \cdot \phi \cdot S_o \quad (9)$$

式(9)中: Q_{og} 为单位体积岩石的油溶气态烃量, m^3/m^3 ; q_{og} 为单位体积油中气态烃的溶解量, m^3/m^3 , 小数; ϕ 为岩石的孔隙度, 小数; S_o 为岩石孔隙中的含油饱和度, 小数。

(2)储层滞留烃量模拟。储层滞留烃主要指油气排出源岩后在运移至圈闭途中滞留在区域盖层下储层中的烃量。储层滞留油气包括吸附残留烃、水溶残留烃、油溶残留气和游离相残留气等形式。储层滞留烃量主要与二次运移的距离、残留油饱和度、运载层孔隙度等诸多因素有关(李明诚, 1994a, 1994b; 周海燕等, 2002, 2003)。

综合考虑储层滞留烃量的各种影响因素, 建立储集层滞留油量(Q_{rs})的计算模型:

$$Q_{rs} = S' \cdot H_{ro} \cdot (\phi \cdot S_{ro} \cdot \rho_o + S_w \cdot q_{wo} \cdot \phi) \cdot k_{path} \quad (10)$$

式(10)中: Q_{rs} 为储层滞留油量, kg; H_{ro} 为残留油的厚度, m; S' 为运聚单元面积, m^2 ; ϕ 为储层的孔隙度, %; S_{ro} 为储集层残留油饱和度, kg/m^3 ; ρ_o 为残留油密度, g/cm^3 ; S_w 为含水饱和度, %; q_{wo} 单位体积水中溶解油量, m^3/m^3 ; k_{path} 为优势通道系数。

储集层滞留气量(Q_{rg})计算模型为:

$$Q_{rg} = S' \cdot H_{rg} \cdot q_{rg} \cdot k_{path} \quad (11)$$

$$q_{rg} = q_{wg} \cdot \phi \cdot S_w + q_{og} \cdot S_{ro} \cdot \phi + S_{rg} \cdot \phi \cdot p \cdot \frac{T_o}{T} \cdot k_z \quad (12)$$

式(11)~(12)中: Q_{rg} 为储层滞留气量, kg; S' 为运聚单元面积, m^2 ; H_{rg} 为残留气厚度, m; q_{rg} 为单位体积储层滞留气量, m^3/m^3 ; k_{path} 为优势通道系数; q_{wg} 为单位体积水溶解气量, m^3/m^3 ; q_{og} 为单位体积油中溶解气量, m^3/m^3 ; ϕ 为储层孔隙度, %; S_w 为含水饱和度, %; S_{ro} 为残余油饱和度, %; S_{rg} 为残余气饱和度, %; T_o 为地表温度, $^{\circ}C$; T 为储集层温度, $^{\circ}C$; P 为压力, MPa; k_z 为气体压缩因子, 取值为 1; Z 为埋深, m。

(3)盖前损失烃量模拟。盖前损失烃量是指源岩层之上的第一套区域盖层形成前源岩的排出烃量, 如果源岩进入排烃门限之前其上覆盖层还没有形成, 则其排出的油气将全部被溢散掉。计算模型为:

$$Q_{ebc} = Q_e \cdot k_{ebc} \quad (13)$$

式(13)中: Q_{ebc} 为盖前损失烃量; Q_e 为源岩排烃量; k_{ebc} 为源岩在区域盖层形成前排出烃与当前累积排烃总量之比。

(4)水溶流失烃量模拟。地下油气水溶流失烃量主要是指区域盖层形成后, 从源岩排出的烃量在进入圈闭途中部分溶解在地层水中随地层水排出油气成藏体系而损失的烃量。油气在运移过程中随水流散失烃量(Q_{wl})主要与运聚系统内区域盖层下伏地层排失的水量及烃在水中的溶解度(q_{ew})呈正相关关系(郝石生和张振英, 1993; 史基安等, 2002)。建立水溶流失烃量数学模型时理想地认为地层在压实过程中没有外界地层水的进入, 只有溶有油气的地层水排出, 排出的地层水量等于储层中减小的孔隙体积。计算模型为:

$$Q_{wl} = q_{ew} \cdot S' \cdot H \cdot \Delta\phi \quad (14)$$

式(14)中: Q_{wl} 为水溶流失烃量, kg; q_{ew} 为烃在水中的溶解度, kg/m^3 ; S' 为运聚单元面积, m^2 ; H 为储层厚度, m; $\Delta\phi$ 为孔隙度的变化值, %。

(5)扩散损失烃量模拟。油气扩散作用是由油

气烃浓度梯度引起的油气分子扩散作用(付晓泰和卢双舫, 1997)。只要存在烃浓度差, 就会发生油气的扩散作用。自油气从源岩生成, 油气分子就开始通过岩石孔隙向上扩散。

据费克定律, 扩散量与历经时间、扩散面积、浓度梯度和扩散系数成正比。考虑多种影响因素后建立扩散烃量计算模型为:

$$Q_{cd} = \int_0^t S \cdot D \cdot \frac{d_c}{d_z} \cdot dt, \quad (15)$$

式(15)中: Q_{cd} 为扩散烃量, m^3 ; d_c/d_z 为烃浓度梯度, m^3/m ; D 为扩散系数, m^2/s ; S 为横截面积(扩散面积), m^2 ; t 为扩散时间, s 。

3.2.2 资源门限判别及其损耗烃量计算 资源门限的判别标准是油气运聚系统内有工业价值的油气藏形成。一个确定的油气成藏体系内何时形成具有工业价值的油气藏以及能形成多大的有工业价值的油气藏取决于 3 方面因素: 一是可供聚集成藏的烃量大小, 它的数值越大形成工业价值油气藏的可能性越大、个数越多、最具价值的单个油气藏规模越大; 二是构造破坏烃量的大小; 三是形成的无价值的油气藏个数及无价值聚集烃量大小。计算模型如下:

$$Q_{res} = Q_{ac} - Q_{ds} - \begin{cases} < 0; \text{未进资源门限(非资源源岩)} \\ = 0; \text{处于资源门限(临界资源源岩)} \\ > 0; \text{进入资源门限(资源源岩)} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: Q_{res} 为油气资源量, m^3 或 kg ; Q_{ds} 、 Q_1 分别为构造破坏烃量、最小非工业价值聚集烃量, m^3 或 kg 。

(1) 油气构造破坏烃量的计算。主要考虑构造变动强度、构造变动期次以及区域盖层的性质和类型、构造变动期与油气运聚门限和高峰期的匹配关系等。计算模型为:

$$Q_{ds} = \sum_{i=1}^n \Delta^i Q_{ds} = f(\text{强度、次数、盖层塑性、烃量}), \quad (17)$$

第一次构造变动破坏烃量为:

$$\Delta^1 Q_{ds} = Q_{me}^1 K_{ds}^1 K_{cap}^1, \quad (18)$$

第二次构造变动破坏烃量为:

$$\Delta^2 Q_{ds} = [(Q_{me}^1 - \Delta^1 Q_{ds}) + \Delta^2 Q_{me}] K_{ds}^2 K_{cap}^2, \quad (19)$$

式(19)中: Q_{me} 为有效运移烃量; K_{ds} 为构造变动强

度; K_{cap} 为盖层封盖系数。此后依此类推。

构造变动强度用地层被剥蚀厚度 H_c (反映垂向变动强度)、断层的断距和断裂密度 L_f (反映剪作用强弱) 以及褶皱的倾角 θ (反映挤压作用强弱) 等表征:

$$K_{ds} = f(H_c, L_f, \theta) \leq 1 \quad (20)$$

$$K_{cap} = f(\text{岩性、成岩作用、欠压实})$$

(2) 非工业聚集烃量的计算。非工业聚集问题可以应用油气藏规模序列理论予以解决(解国军等, 2003)。基本原理是利用研究区已经发现的油气藏个数及大小进行规模序列分析预测出研究区所讨论的油气运聚系统内潜在的油气藏个数(n) 及每个油气藏储量的大小($Q_i, i=1, 2, \dots, n$)。在确知或研究后得到研究区最小经济价值的油气藏规模(Q_m) 后, 则无价值的油气藏个数(l)、非工业聚集烃量(Q_1) 可计算获得:

$$Q_i = \frac{Q_{max}}{i^k}, \quad (21)$$

$$Q_1 = \sum_{i=m}^n Q_i, \quad (22)$$

式(21)~(22)中: Q_1 为非工业聚集烃量, m^3 或 kg ; Q_i 为运聚单元的 i 个油藏的规模, m^3 或 kg ; Q_{max} 为运聚单元最大规模油气藏, m^3 或 kg ; m 为研究区最小经济规模油藏序号。

4 东营凹陷油气成藏体系定量评价

4.1 成藏门限的确定及可供聚集烃量的计算

利用油气损耗烃量计算模型, 获得了东营凹陷各成藏体系的油气成藏门限(表 2)。不难看出, 在各种类型的损耗烃量中, 以源岩残留烃最大, 表明源岩的排烃效率相对较低, 尤其是在成藏体系 I 中, 源岩残留烃量达到了 $106.43 \times 10^8 t$, 整个凹陷的残留量则达到了 $271.85 \times 10^8 t$, 由此可知源岩的排烃效率仅为 30.29%, 原因在于东营凹陷晚第三系源岩以厚层暗色泥岩和油页岩为主, 断裂不发育, 排烃不畅(朱光有等, 2003)。主要与砂体展布及其孔隙度大小有关, 储层滞留烃量相对较小, 总计为 $35.45 \times 10^8 t$; 运移流失烃量更小, 仅为 704.16×10^4 , 这主要是由于石油在水中的溶解度很小, 而东营凹陷的有机质类型主要为 I - II_A 型, 以生油为主。成藏门限计算结果表明, 成藏体系 I 的成藏门限值最大, 为 $122.50 \times 10^8 t$, 其余几个成藏体系成藏门限

表2 东营凹陷油气成藏体系油气成藏门限数据

Table 2 Data of petroleum accumulation threshold of all petroleum accumulation systems in Dongying sag

代号	成藏体系 名称	生烃量 (10^8 t)	源岩残留烃量 (10^8 t)	储层滞留烃量 (10^8 t)	运移流失烃量 (10^8 t)	油气聚烃门限 (10^8 t)	可供聚集烃量 (10^8 t)
I	东营中央背斜带	159.95	106.43	16.06	154.40	122.50	36.45
II	王家岗-八面河	24.21	17.37	2.05	115.68	19.44	5.78
III	乐安-纯化鼻状构造	52.01	37.55	4.34	17.92	41.89	10.12
IV	博兴洼陷南坡	12.86	9.64	0.973	8.48	10.61	3.25
V	青城低凸起北坡	16.09	12.64	1.04	6.00	13.67	2.42
VI	平方王-大芦湖	31.08	22.81	2.48	71.76	25.30	4.78
VII	滨县凸起南坡	40.90	28.09	3.84	74.56	31.94	6.95
VIII	东营凹陷北坡	52.89	37.32	4.67	225.36	42.01	12.87
	总计	389.99	271.85	35.45	704.16	307.36	82.62

表3 东营凹陷油气成藏体系油气资源数据

Table 3 Data of petroleum resources of all petroleum accumulation systems in Dongying sag

代号	成藏体系 名称	可供聚集烃量 (10^8 t)	构造破坏烃量 (10^8 t)	无价值聚集烃量 (10^8 t)	资源量 (10^8 t)	探明储量 (10^8 t)	剩余资源量 (10^8 t)
I	东营中央背斜带	36.45	7.72	20.23	8.50	5.40	3.10
II	王家岗-八面河	5.78	0.26	0.42	5.10	2.64	2.46
III	乐安-纯化鼻状构造	10.12	1.77	4.46	3.89	2.00	1.89
IV	博兴洼陷南坡	3.25	0.82	1.13	1.30	0.40	0.90
V	青城低凸起北坡	2.42	0.85	1.09	0.48	0.26	0.22
VI	平方王-大芦湖	4.78	0.24	0.50	4.04	1.90	2.14
VII	滨县凸起南坡	6.95	0.59	2.86	3.50	1.59	1.91
VIII	东营凹陷北坡	12.87	0.49	1.68	10.70	6.30	4.41
	总计	82.62	12.74	32.37	37.51	20.49	17.03

值分布在 $10.61 \times 10^8 \sim 42.01 \times 10^8$ t 的范围内,以成藏体系 IV 最小。可供聚集烃量中,成藏体系 I 为 36.45×10^8 t,其次为成藏体系 III 和成藏体系 VIII,在 10×10^8 t 以上,其余成藏体系的可供聚集量均在 10×10^8 t 以下。

4.2 资源门限的确定及资源量的计算

东营凹陷经历了侏罗纪前、燕山运动二幕、燕山运动尾幕、喜山运动济阳幕、喜山运动东营幕等 5 次构造运动,但是由于凹陷油气成藏期相对较晚,因此,早期的构造运动对于油气成藏没有影响,只是喜山运动对于油气成藏具有一定的破坏作用,利用构造破坏烃量计算模型获得了构造破坏烃量(庞雄奇, 2003b)(表 3)。按照目前东营凹陷勘探开发情况,将最小经济规模油藏储量定位 15×10^4 t,获得了东营凹陷不同成藏体系的非工业聚集烃量(表 3)。结合可供聚集烃量计算结果及目前已探明储量的统计结果,获得了各成藏体系资源量和剩余资源量(表 3),在剩余资源量中,成藏体系 VIII 最大,为 4.41×10^4 t,成藏体系 I 次之,为 3.10×10^4 t,成藏体系 V

最小,仅为 0.22×10^4 t,其余几个成藏体系介于 $0.9 \times 10^8 \sim 2.46 \times 10^8$ t,凹陷总剩余资源量为 17.03×10^8 t,结合目前 20.49×10^8 t 的探明储量,东营凹陷的资源探明率为 54.6%。

4.3 油气成藏体系的定量评价

综合以上两个方面的研究成果,将东营凹陷各成藏体系的生烃量、排烃量、可供聚集烃量、资源量、探明储量和剩余资源量以柱形图的形式投到成藏体系内,并将剩余资源量与各成藏体系面积相除,得到各成藏体系剩余资源强度,从而获得油气成藏体系的定量评价图(图 5)。不难看出,东营凹陷剩余资源量主要分布在成藏体系 VIII、I 中,其次为成藏体系 II、VI,再次为成藏体系 VII、III,而成藏体系 IV、V 相对较差。剩余资源强度以成藏体系 VIII 最大,超过了 60×10^4 t/km²,其次为成藏体系 I、II、VI,在 $30 \times 10^4 \sim 60 \times 10^4$ t/km² 之间,成藏体系 III、VII 则在 $20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ t/km² 之间,成藏体系 V 最差,小于 10×10^4 t/km²。

成藏体系 VIII 油气来源于民丰洼陷,其烃源岩品

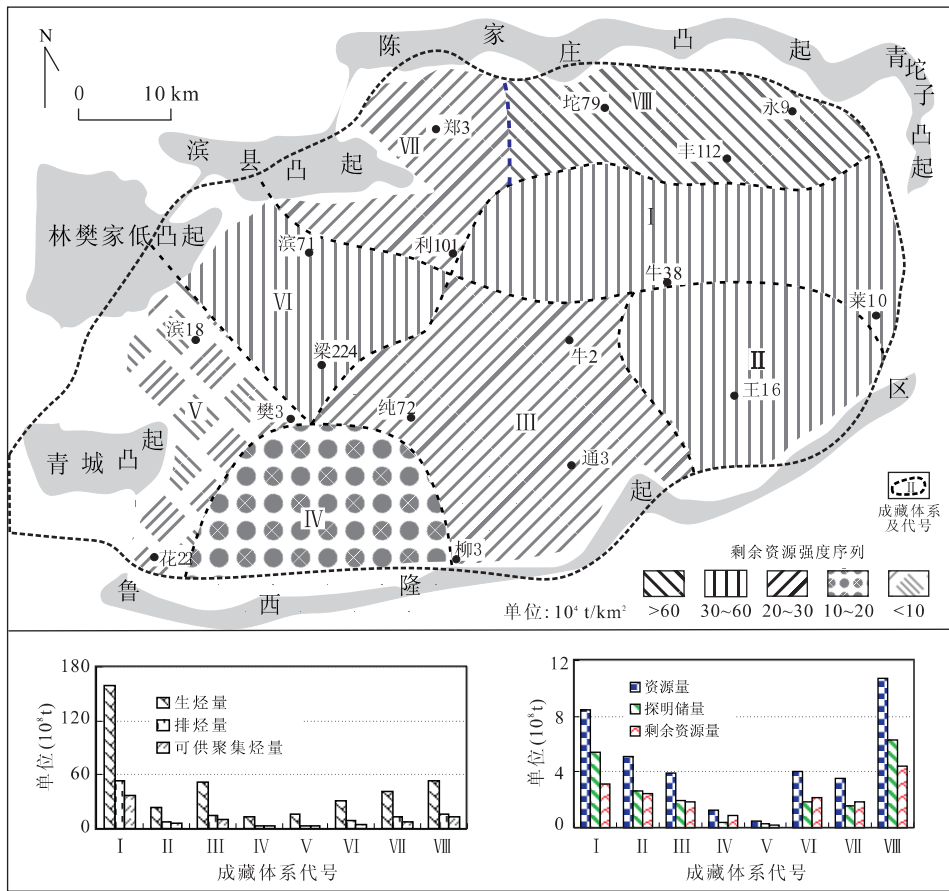


图 5 东营凹陷油气成藏体系定量评价

Fig. 5 Diagrams showing Quantitative evaluation of petroleum accumulation systems in Dongying sag

质好,排烃量大,为形成丰富的油气聚集提供了有利的物质保障;该成藏体系位于东营凹陷陡坡带,接近物源且快速堆积,有利于有机质的保存和孔隙空间的保护,快速堆积形成了良好的砂泥岩互层,为形成大规模的岩性圈闭和地层圈闭提供了条件,并且陡坡带控凹断裂发育,为深层油气的垂向运移提供了优势通道的同时,形成了丰富的断层相关圈闭。晚期坳陷沉积阶段,构造稳定,新近系地层形成了良好的封盖条件。由此看来,成藏体系Ⅷ具备良好的生储盖组合特征,且圈闭类型多样,输导条件优越,多种类型油藏同时发育。

成藏体系Ⅰ与成藏体系Ⅷ相比,油气主要来源于牛庄洼陷和利津洼陷,排烃量同样较大,油气物质基础丰富。中央隆起带断裂发育,输导条件优越,断裂控制的圈闭类型较多,且发育各种透镜体岩性圈闭(郝雪峰等,2006;李素梅等,2007)。

综上所述,多种圈闭类型配合良好的输导条件和丰富的油源,加之新近系发育的区域盖层,使得这些成藏体系成为剩余资源强度较大的有利区带。

5 结论

(1)油气成藏的首要条件是生成的油气量大于损耗的油气量,在量值上成藏门限与油气聚集前损耗的最低烃量对应一致;(2)油气成藏门限是形成油气藏所需的最小损耗烃量的表征,其值越大表明成藏的难度也越大,反之则容易;(3)东营凹陷可以划分出8个成藏体系,各成藏体系都进入了成藏门限和资源门限,其中,成藏体系Ⅷ的剩余资源量最大,其次为成藏体系Ⅰ,成藏体系Ⅴ最小;(4)东营凹陷总的剩余资源量为 17.03×10^8 t,资源探明率为 54.6%,剩余资源强度最大的为成藏体系Ⅷ,成藏体系Ⅰ次之。

References

- Fu, X. T., Lu, S. F., 1997. Dissolving character for the components of natural gas and its significance, *Geochimica*, 26(3): 60-66 (in Chinese with English abstract).
- Hao, S. S., Zhang, Z. Y., 1993. The chavtacteristic of the sol-

- ability of natural gas in formation waters and its geological significance. *Acta Petrolei Sinica*, 14(2): 12—22 (in Chinese with English abstract).
- Hao, X. F., Chen, H. H., Gao, Q. L., et al., 2006. Microcharging processes of hydrocarbon in the Niuzhuang lentoid sandy reservoirs, Dongying depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 182—190 (in Chinese with English abstract).
- Hu, C. Y., 1982. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China. *Acta Petrolei Sinica*, 3(2): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. Y., Tong, X. G., Xu, S. B., 1986. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan basin. *Petroleum Exploration and Development*, (1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Fu, G., 1994. Oil-gas migration type and supplying unit characteristics of Fuyu oil layer in Sanzhao area. *Natural Gas Industry*, 14(6): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Jin, Z. J., et al., 2002. Threshold control over hydrocarbons and its application in distinguishing valid source rock. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 689—695 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Zhao, W. Z., Li, W., 1997. New method of petroleum system division and its application. *Explorationist*, 2(1): 38—41 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., 1994a. Migration of oil and gas (2nd edition). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Li, M. C., 1994b. Present status of hydrocarbons migration research and its development. *Petroleum Exploration and Development*, 21(2): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Qiu, G. Q., Jiang, Z. X., et al., 2007. Origin of the subtle oils in the Niuzhuang sag. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 213—218 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Pan, Y. L., Xiao, J. X., et al., 2000. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 260—266 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. C., Qian, K., Wu, S. X., 1996. Theory of corresponding distribution of fields and oil-gas girdles in Dongying depression. *Oil & Gas Geology*, 17(3): 185—189 (in Chinese with English abstract).
- Magoon, L. B., Dow, W. G., 1994. The petroleum system: From source to trap. *AAPG Memoir*, 60: 3—24.
- Pang, X. Q., Jiang, Z. X., Li, J. Q., et al., 2000. Geologic thresholds in the process of forming old and gas reservoir and their functions of controlling petroleum. *Journal of China University of Petroleum*, 24(4): 53—57 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., Jin, Z. J., Jiang, Z. X., 2003a. Quantitative models of hydrocarbon accumulation (Volume 8). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Pang, X. Q., Li, P. L., Jin, Z. J., et al., 2003b. Hydrocarbon accumulation threshold and its application in Jiyang depression. *Oil & Gas Geology*, 24(3): 204—209 (in Chinese with English abstract).
- Shi, J. A., Deng, J. H., Zeng, F. G., et al., 2002. An experiment on physically simulating secondary oil migration and analysis of dissipating features. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 333—338 (in Chinese with English abstract).
- Song, Z. X., 1987. The selection of evaluation modes of oil and gas resources. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(1): 104—113 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. C., 1994. Introduction of geological evaluation on petroleum resource. Petroleum Industry Press, Beijing, 1—125 (in Chinese).
- Xie, G. J., Jin, Z. J., Xiao, H. Q., et al., 2003. Undiscovered pool sizes prediction of higher exploration degree area. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 16—18 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. D., 1986. China mathematical geology (Serial 1). Geology Press, Beijing, 1—172 (in Chinese).
- Zhou, H. Y., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., 2002. Key factors controlling migration and accumulation efficiency of oil and gas and their quantitative evaluation. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 14—18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. Y., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., et al., 2003. Hydrocarbon accumulation threshold and its study methods. *Acta Petrolei Sinica*, 24(6): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Zhang, S. C., et al., 2003. Forming mechanisms and heterogeneity of source rock: A case study in Dongying depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(4): 95—100 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 付晓泰,卢双舫,1997. 天然气组分的溶解特征及其意义. 地球化学,26(3):60—66.
- 郝石生,张振英,1993. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义. 石油学报,14(2):12—22.
- 郝雪峰,陈红汉,高秋丽,等,2006. 东营凹陷牛庄砂岩透镜体油气藏微观充注机理. 地球科学——中国地质大学学报,31(2):182—190.
- 胡朝元,1982. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论. 石油学报,3(2):9—13.
- 胡见义,童晓光,徐树宝,1986. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布. 石油勘探与开发,(1):1—8.
- 姜振学,付广,1994. 三肇地区扶余油层油气运移形式及供油单元特征. 天然气工业,14(6):24—27.
- 姜振学,庞雄奇,金之钧,等,2002. 门限控烃作用及其在有效烃源岩判别研究中的应用. 地球科学——中国地质大学学报,27(6):689—695.
- 姜振学,赵文智,李伟,1997. 应用高势面划分含油气系统及其应用. 中国石油勘探,2(1):38—41.
- 解国军,金之钧,肖焕钦,等,2003. 成熟探区未发现油藏规模预测. 石油勘探与开发,30(3):16—18.
- 李明诚,1994a. 石油与天然气运移(第二版). 北京:石油工业出版社.
- 李明诚,1994b. 油气运移研究的现状与发展. 石油勘探与开发,21(2):1—6.
- 李素梅,邱桂强,姜振学,等,2007. 牛庄洼陷“岩性油气藏”油气成因. 地球科学——中国地质大学学报,32(2):213—218.
- 林畅松,潘元林,肖建新,等,2000. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念. 地球科学——中国地质大学学报,25(3):260—264.
- 刘兴材,钱凯,吴世祥,1996. 东营凹陷油气场环对应分布论. 石油与天然气地质,17(3):185—190.
- 庞雄奇,姜振学,李建青,等,2000. 油气成藏过程中的地质门限及其控制油气作用. 石油大学学报(自然科学版),24(4):53—57.
- 庞雄奇,金之钧,姜振学,2003a. 油气成藏定量模式. 油气成藏机理研究系列丛书(卷八). 北京:石油工业出版社.
- 庞雄奇,李丕龙,金之钧,等,2003b. 油气成藏门限研究及其在济阳坳陷中的应用. 石油与天然气地质,24(3):204—209.
- 史基安,邓津辉,曾凡刚,等,2002. 石油二次运移物理模拟及运移特征分析. 沉积学报,20(2):333—338.
- 宋芝祥,1987. 油气资源评价方法的选择. 沉积学报,5(1):104—113.
- 武守诚,1994. 石油资源地质评价导论. 北京:石油工业出版社,1—125.
- 赵旭东,1986. 中国数学地质(一). 北京:地质出版社,1—172.
- 周海燕,庞雄奇,姜振学,2002. 石油和天然气运聚效率的主控因素及定量评价. 石油勘探与开发,29(1):14—18.
- 周海燕,庞雄奇,姜振学,等,2003. 油气成藏门限及其研究方法. 石油学报,24(6):40—44.
- 朱光有,金强,张水昌,等,2003. 烃源岩非均质性的控制因素研究——以东营凹陷为例. 矿物岩石,23(4):95—100.