

油气成藏门限研究及其在济阳拗陷中的应用*

庞雄奇^{1,2}, 李丕龙³, 金之钧^{1,4}, 张善文³, 左胜杰^{1,2}, 陈冬霞^{1,2}

(1. 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 石油大学

盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 中国石化股份公司胜利油田分公司, 山东东营 257000;

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 成藏门限从定量角度阐述油气藏形成与分布规律。它是指确定的成藏体系内形成油气聚集所需要损耗的最低烃量, 包括源岩残留、储层滞留、盖前排失、围岩损耗、水溶流失和扩散等6个方面。地史过程中, 油气生成量达到或超过成藏体系内能够损耗的最低烃量时, 油气聚集作用才能开始进行。在源岩生油气总量一定的情况下, 成藏体系内油气的成藏时间、运聚烃量和油气藏最大规模等都受成藏门限的制约。对济阳拗陷28个成藏体系的应用研究表明, 油大量聚集成藏前最低损耗烃量介于 $0.36 \times 10^8 \sim 18.4 \times 10^8 \text{ t}$, 它主要随排烃强度、油气运聚范围和目的层的倾角的增大而增大, 随砂地比、构造变动次数和剥蚀厚度的增大而减小。济阳拗陷最有利的成藏体系包括沾化凹陷的渤南-孤岛成藏体系, 东营凹陷的中央背斜带、北部陡坡带、滨县凸起南坡、王家港-八面河和惠民凹陷的中央背斜带以及车镇凹陷的义和庄凸起北坡、车镇凹陷北等, 它们均已进入成藏门限, 远景资源量 $2.18 \times 10^8 \sim 6.31 \times 10^8 \text{ t}$, 能够形成的最大油气藏储量规模可达 $0.16 \times 10^8 \sim 4.79 \times 10^8 \text{ t}$ 。

关键词: 成藏门限; 成藏体系; 资源评价; 济阳拗陷

第一作者简介: 庞雄奇, 男, 42岁, 教授(博士生导师), 盆地分析与资源评价

中图分类号: TE112.12

文献标识码: A

中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, 如源控油气理论^[1]、复式油气聚集带理论^[2]、场环对应分布论^[3]、坡折带低水位砂体控油理论^[4]等, 对陆相盆地油气藏形成和分布规律进行了卓有成效的探索。总体而言, 油气分布规律的研究仍以定性为主。本文试图从门限控烃的角度研究油气藏形成与分布规律^[5]。

1 基本原理

1.1 概念

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。成藏门限在量值上即是指油气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。在地史含义上, 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。

油气的损耗依先后和形式可分为源岩残留、

储层滞留、盖前排失、围岩吸附、水溶流失和扩散等。就机理而言, 油气在成藏体系内部的散失作用主要包括岩石吸附、毛细管封堵、地下水溶(油气)、地下油溶(气); 油气向成藏体系外部的散失等(图1和式1)。

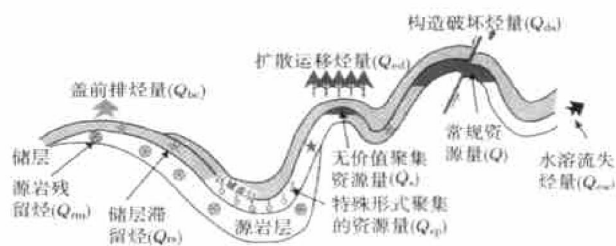


图1 油气生排运聚与损耗烃物质平衡概念模型图

Fig. 1 Concept of hydrocarbon accumulation threshold

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

式中, Q_{li} 代表第 i 个条件形成的损耗烃量, t : 其他符号的含义如图1所示。

成藏门限的判识标准为

* 本文获得教育部优秀教师基金和国家科技攻关项目“济阳拗陷复杂隐蔽油气藏地质评价和勘探关键技术研究”(编号: 2001BA605A09)资助

收稿日期: 2003-05-26

$$Q_p - \sum_{i=1}^n Q_{1_i} \begin{cases} < 0 & \text{未进成藏门限} \\ = 0 & \text{处于成藏门限} \\ > 0 & \text{可能已进成藏门限} \end{cases}$$

式中 Q_p 为源岩生成烃量, t。

1.2 证据

成藏门限同生烃门限和排烃门限一样是客观存在的^[6]。

统计结果表明, 中国大大小小的沉积盆地有近 500 个, 迄今仅在 82 个盆地中发现油气田^[7]。除了所处勘探阶段不同和技术上的原因外, 一部分盆地未进入成藏门限可能是造成上述现象的根本原因。能够形成商业油气流的生烃强度有两个衡量指标, 一是最大生烃强度要大于 $1 \times 10^6 \text{ t/km}^2$; 另一是平均生烃强度要大于 $0.5 \times 10^6 \text{ t/km}^2$ 。戴金星等通过对我国天然气的分布特征研究也得出了类似的认识: 形成特大型天然气藏的源岩生气强度需超过 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 形成大中型气田的生气强度需超过 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。如果研究区源岩的生气强度低于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 则找到气田的可能性较小^[8]。

物理模拟实验结果证明, 油气在初次运移和二次运移中均有油气的损耗和散失。近年来, 国内外学者针对油气的二次运移进行了大量的物理模拟实验和计算机数值模拟。一些学者坚持“油气在二次运移过程中损耗量巨大”的观点^[9, 10], 因为油只有在输导层内达到 20%~30% 的饱和度之后才能以游离态运移, 只有在达到和超过这些损耗值后才有油气的聚集。

多相渗流理论研究表明, 油气在多孔介质中的流动遵循多相渗流定律, 油气在烃源岩中的饱和度只有超过排烃临界饱和度后才能大量排出^[11]。

在地质现象剖析时发现, 下述 5 种现象可判定运移途中散失了大量的烃类: 钻井过程中发现的微含油、油迹、油斑的砂岩和微含油的生物碎屑灰岩等油气显示; 测井解释的含油层、油水同层; 用肉眼难以观察到的分散于水中和吸附于岩石表面的微量烃; 挥发逸散于大气的烃类; 由于地层剥蚀、氧化作用所形成的重质稠油不能形成具工业价值的油气藏。

1.3 方法

油气成藏门限的研究实质是生成烃量、损耗烃量及其变化历史的研究(图 2)。

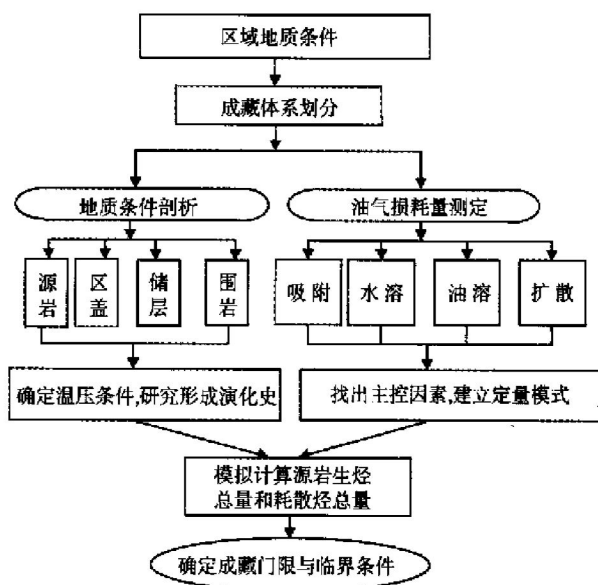


图 2 油气成藏门限计算原理与流程

Fig. 2 Principle and process of hydrocarbon accumulation threshold calculation

首先, 在剖析区域地质条件的前提下, 对成藏体系进行划分。盆地演化过程中形成并不断演化的油气聚集带及其与一套或多套供油气源的有机组合称之为油气成藏体系。它与含油气系统的最大区别是分析问题的视角不同。两者虽然都采用了系统分析方法, “油气成藏体系”是以油气聚集的构造或圈闭的形成、演化为主线, 以烃源岩形成、分布与演化规律为基础进行油气成藏规律的系统分析(图 3)^[12]。

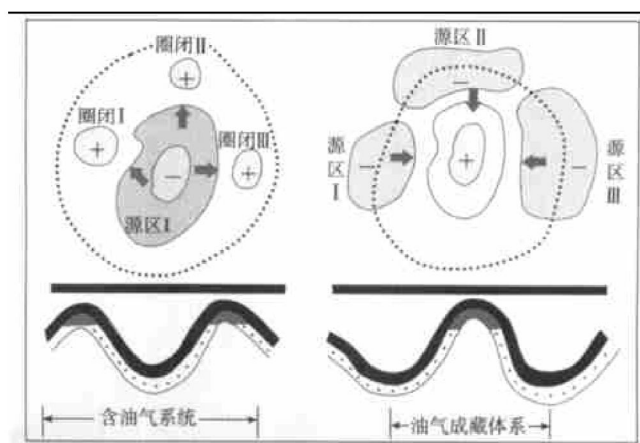


图 3 含油气系统与油气成藏体系概念的区别和联系

Fig. 3 Comparison of petroleum system and petroleum accumulation system

其次, 在对源岩、盖层、储层和围岩进行剖析的基础上确定温、压等条件, 研究其形成演化史,

测定吸附、水溶、油溶和扩散等造成的油气损耗量或相关参数,找出各类损耗烃量的主控因素以确定定量关系模式。然后,依据物质平衡原理和回剥模拟计算方法,模拟计算源岩生烃总量和耗散烃总量。最后进行油气成藏门限的判识与临界地质条件的恢复。

1.4 意义

(1) 成藏门限具有时间的含义。随着源岩埋深加大,生烃量逐渐增加,与此同时,成藏体系内各种损耗烃量也逐渐增加。当生烃量满足了各种损耗需要后,即进入成藏门限(图 4),成藏体系内开始有油气聚集。因此,进入成藏门限的时刻可以看作是成藏体系内油气成藏的最早时间。

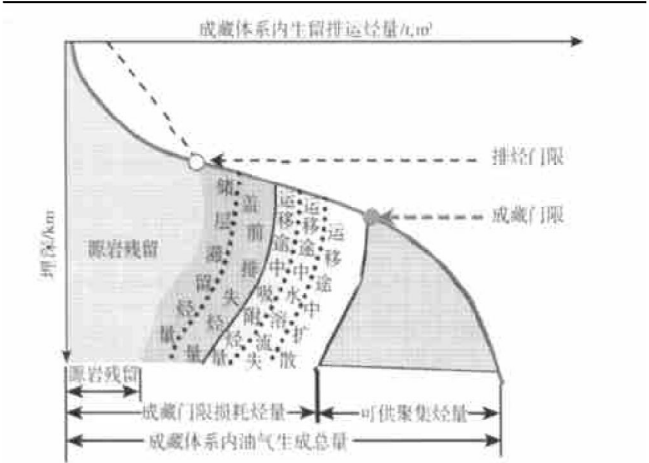


图 4 成藏门限判别和恢复研究概念模型
Fig. 4 Discriminative concept model of accumulation threshold

(2) 油气成藏门限强调了对损耗烃量的研究。在生、排烃量相近的地区,损耗烃量越大,成藏条件越差,资源潜力越小;损耗烃量越小,资源潜力越大,越有利于油气勘探。在计算成藏体系内油气生成总量和成藏前需要损耗的烃量后,可以通过物质平衡方法求出体系内可供聚集成藏的烃量,它代表了研究区油气资源潜力极限。

(3) 统计表明,成藏体系内油气资源量的大小对其内最大油气田(藏)的规模也具有明显的控制作用,形成大中型气田往往要求有一定规模以上的油气资源量(图 5)。

(4) 通过计算成藏体系内油和气的资源量,可以计算出它们之间的相对比率,从而确定油气资源的属性。

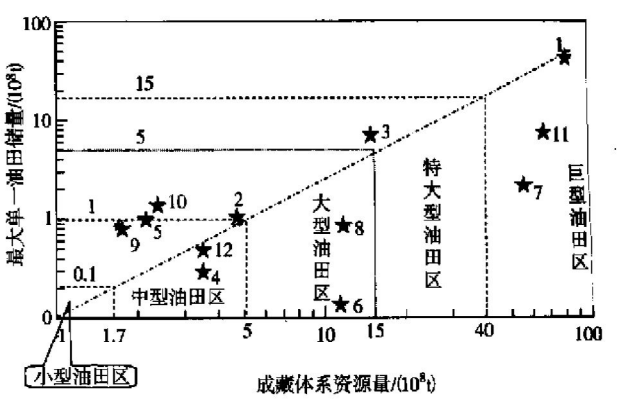


图 5 中国主要盆地成藏系统资源量与最大单一油田储量关系图
Fig. 5 Relation between resources and the largest oilfields' reserves in the accumulation systems in our major basins

1—松辽;2—二连;3—渤海湾;4—江汉;5—南襄;6—四川;7—鄂尔多斯;8—塔里木;9—柴达木;10—吐哈;11—准噶尔;12—酒西

2 在济阳拗陷的初步应用

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部,由东营、惠民、沾化、车镇 4 个主要凹陷和若干个分隔凹陷的凸起组成,总面积为 $2.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。自 1961 年华 8 井首获工业油流,截止 1999 年底,济阳探区已发现 70 个油气田,探明含油面积 2178.8 km^2 ,探明石油地质储量 $41.6 \times 10^8 \text{ t}$;探明含气面积 239.3 km^2 ,探明天然气地质储量 $361.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。资源探明程度达 56.97%,已属中高勘探程度区。相对而言,济阳凹陷的石油地质条件和成藏规律已经比较清楚,各项资料丰富齐全,十分有利于开展成藏门限的探索性研究和检验工作。依据成藏体系的概念和内涵结合济阳拗陷的油气地质特点将其共划分出 28 个成藏体系,其中 26 个为主要成藏体系(表 1)。

2.1 成油门限

分别计算出济阳拗陷主要成藏体系的成藏门限,并与影响油气运聚效率的因素进行逐步回归,可以建立油成藏门限(Y, t)与地质要素之间的定量关系式

$$Y = 8.7023 \times 10^9 + 9.065 \times 10^7 X_1 - 4.0024 \times 10^9 X_2 + 7.6493 \times 10^5 X_3 - 1.0001 \times 10^9 X_4 - 1.1749 \times 10^8 X_5 - 3.6519 \times 10^6 X_6$$

相关系数为 0.95,式中: X_1 为排烃强度, 10^4 t/km^2 ; X_2 为砂地比, %; X_3 为运聚范围, km^2 ;

表 1 济阳拗陷成藏体系油气资源表

Table 1 Hydrocarbon resources in various accumulation systems in Jiyang depression

成 藏 体 系		生烃量	成藏门限	可供聚集	是否进入	无价值聚集	资源量	探明地质	剩余资源	已发现最大油田	
代号	名称	/(10 ⁸ t)	/(10 ⁸ t)	烃量/(10 ⁸ t)	成藏门限	烃量/(10 ⁸ t)	/(10 ⁸ t)	储量/(10 ⁸ t)	量/(10 ⁸ t)	名称	储量/(10 ⁸ t)
1	东营中央背斜带	75	18.4	56.59	是	48.98	7.61	4.04	3.57	东辛	2.42
2	王家岗- 八面河	66.6	10.2	56.35	是	50.45	5.9	2.64	3.26	八面河	0.99
3	乐安- 纯化鼻状构造	33.8	4.56	29.28	是	25.63	3.65	1.9	1.75	乐安	1.25
4	博兴洼陷南坡	25	4.91	20.06	是	18.86	1.2	0.56	0.64	金家	0.35
5	青城低凸起北坡	4.54	0.36	4.177	是	3.8	0.37	0.17	0.2	高青	0.17
6	平方王- 大芦湖	43.8	5.03	38.8	是	34.7	4.1	2.17	1.93	尚店	0.8
7	滨县凸起南坡	38.7	3.01	35.69	是	30.77	4.92	1.81	3.11	滨南	0.93
8	东营凹陷北带	124	5.99	118.42	是	89.02	9.4	6.77	2.63	胜坨	4.79
9	惠民凹陷南坡	29	22.7	6.26	是	5.13	1.13	0.48	0.65	临南	0.29
10	惠民中央背斜带	74.4	24.5	49.89	是	43.17	6.72	2.13	4.59	临盘	1.4
11	惠民凹陷北部	0.92	1.13	- 0.21	否	0	0	0	0	/	/
12	沙河街鼻状构造	11.4	12.6	- 1.21	否	0	0	0	0	/	/
13	阳信洼陷北部	4.1	4.29	- 0.19	否	0	0	0	0	/	/
14	流钟洼陷南坡	0	3.33	- 3.33	否	0	0	0	0	/	/
15	流钟洼陷北坡	0	3.52	- 3.52	否	0	0	0	0	/	/
16	东风港- 套尔河	28.7	5.96	22.75	是	20.95	1.8	0.38	1.42	东风港	0.29
17	车镇凹陷北	21	2.45	18.56	是	16.22	2.34	0.16	2.18	英雄滩	0.16
18	义和庄凸起北坡	30.4	4.43	26.01	是	22.26	3.75	0.88	2.87	大王庄	0.28
19	义和庄凸起南坡	7.41	0.81	6.604	是	6.204	0.4	0.39	0.01	邵家	0.22
20	陈家庄凸起北坡	15.9	4.67	11.22	是	10.26	0.96	0.3	0.66	陈家庄	0.3
21	孤南- 富林	27.9	5.48	22.38	是	19.19	3.19	0.6	2.59	垦利	0.29
22	渤南- 孤岛	90.1	17.7	72.37	是	60.26	12.1	5.8	6.31	孤岛	3.88
23	埕东地区	21.4	2.94	18.44	是	15.44	3	1.04	1.96	埕东	0.6
26	桩西- 长堤- 孤东	48.6	3.6	44.97	是	37.87	7.1	4.26	2.84	孤东	2.64
27	垦东地区	0	12.4	- 12.4	否	0	0	0	0	/	/
28	青坨子	0	6.92	- 6.92	否	0	0	0	0	/	/

X_4 为构造变动次数; X_5 为目的层倾角, (°); X_6 为剥蚀厚度, m。

利用建立的关系式可以求出低勘探程度成藏体系的成藏门限, 并通过与对应成藏体系的生烃量比较判断该成藏体系是否进入成藏门限。结果表明, 济阳拗陷 26 个成藏体系中有 19 个已经进入成藏门限(表 1), 另外 7 个由于生烃量小而尚未进入成藏门限, 这从目前的油气勘探结果也可得到印证。

2.2 最大油气田(藏)规模

成藏体系内油气资源量对其内最大油气田的规模也具有明显的控制作用, 形成大中型油气田往往要求有一定规模以上的油气资源量。对济阳拗陷主要成藏体系资源量与最大单一油田储量的关系进行回归, 可建立二者之间的定量关系: $q_{\max} = \exp(0.321\ 697Q)0.232\ 997$, 其中 Q 系指成藏体系的资源量, $q_{\max}$ 系指成藏体系内最大单一油田储量。将济阳拗陷各成藏体系的资源量分别代入上述定量模式, 可得最大油田规模(表 1)。共有 9 个

成藏体系的最大单一油田储量高于 1.0×10^8 t, 它们分别是东营凹陷北带(8)、渤南- 孤岛(22)、埕东地区(25)、东营中央背斜带(1)、桩西- 长堤- 孤东(26)、惠民中央背斜带(10)、王家岗- 八面河(2)、乐安- 纯化(3)和滨县凸起南坡(7)。

2.3 剩余资源量

对成藏体系的潜在油气资源分布进行预测, 在此基础上优选有利勘探区、指导勘探部署。济阳拗陷剩余资源潜力最大的 5 个成藏体系分别是渤南- 孤岛、惠民中央背斜带、东营中央背斜带、王家岗- 八面河、滨县凸起南坡, 其剩余资源量分别为 6.31×10^8 t, 4.59×10^8 t, 3.57×10^8 t, 3.26×10^8 t 和 3.11×10^8 t。济阳拗陷剩余资源量为 46.72×10^8 t, 共有 15 个成藏体系的剩余资源量大于 1×10^8 t, 说明其勘探潜力仍相当可观。

2.4 有利勘探区

将上述各成藏体系资源量、最大油田规模、剩余资源量的计算结果和比较标注在平面图上可以直观地比较并优选有利的成藏体系(图 6)。

- Geochem, 1990, (16): 1~3
- 10 Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration[J]. AAPG Bull, 1995, 79: 19~29
- 11 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 1~157
- 12 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 叠合盆地油气资源评价问题及其研究意义[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 9~13

HYDROCARBON ACCUMULATION THRESHOLD AND ITS APPLICATION IN JIYANG DEPRESSION

Pang Xiongqi¹ Li Pilog² Jin Zhijun¹ Zhang Shanwen² Zuo Shengjie¹ Chen Dongxia¹

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Accumulation Mechanism, Ministry of Education, University of Petroleum, Beijing;

2. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong)

Abstract: Hydrocarbon accumulation threshold quantitatively expounds the regularity of hydrocarbon distribution. Hydrocarbon accumulation threshold refers to the least amount of oil and gas dissipated during the process of pool formation in the accumulation system. Dissipated hydrocarbon includes those left within the source rock, detained in the reservoir bed, discharged before cap rock being formed, adsorbed by adjacent rock, and dissolved in water, as well as oil and gas diffusion. The mechanisms of hydrocarbons dissipation within the pool-forming system mainly include being adsorbed by rocks, blocked by capillary and dissolved by subsurface water and oil. The manners for hydrocarbons dissipated out of the pool-forming system mainly involves oil and gas diffused upward, oil and gas dissolved in formation water-flow and destroyed by tectonic movement after the formation of pools. Statistics, physical modeling experiment, multiphase percolation theory and geological phenomena analyses prove that hydrocarbon accumulation threshold, like hydrocarbon generation threshold and hydrocarbon expelling threshold, exist objectively. The essential research of hydrocarbon accumulation threshold is modeling and calculating the amount of hydrocarbon dissipation. On the basis of studying the regional geological condition, dividing different accumulation systems, and geological analyses of source, cap and reservoir rocks, the research is, firstly, determining the temperature and pressure conditions of pool formation and the history of oil/gas reservoir evolution, as well as measuring the amount of hydrocarbon dissipation through adsorption, dissolution and diffusion for the sake of finding out the main factors controlling the dissipation and confirming the quantitative relationship; secondly, modeling the total amount of hydrocarbon generation in the source rocks and the total amount of hydrocarbon dissipation; and lastly, discriminating the accumulation threshold and recovering the critical geological condition. In the geological history, hydrocarbon begins to accumulate when the amount of hydrocarbon generated in source rock reaches or exceeds the least amount of oil and gas dissipated. Accumulation period, amount of hydrocarbon migration and accumulation and the largest reservoir size are all constrained by hydrocarbon accumulation threshold. The research of hydrocarbon accumulation threshold of 28 accumulation systems in Jiyang depression shows that the least amount of oil and gas dissipation is from 0.036 billion tons to 1.84 billion tons, which increases with the increase intensity of hydrocarbon expulsion, range of migration and accumulation and dip angle of objective formation and decreases with the increase of sand-stratum ratio, tectonic movements and denuded thickness. Finally, on the basis of calculation and comparison the amount of hydrocarbon generation, the resources, largest oil/gas field and favorable targets can then be predicted.

Key words: accumulation threshold; accumulation system; resource evaluation; Jiyang depression