

文章编号: 1000-0550(2000)01-0151-06

# 油气聚集微观定量模型<sup>①</sup>

罗明高 黄键全 唐 洪

(西南石油学院勘探系 四川南充 637001)

**摘 要** 不管是油气的运移还是聚集过程都是在储层孔隙中进行的, 因此, 储层孔隙结构特征直接影响了油气的聚集过程和油气藏的形成分布特征。从孔隙结构出发, 研究油气聚集的微观定量过程, 划分油气聚集的三个定量阶段, 建立了不同非均质组合单一圈闭和系列圈闭的油气聚集分布模型, 对传统石油地质学进行了补充和完善, 也在定量地质学研究方面进行了成功的尝试

**关键词** 油气聚集 微观 定量模型 微观过程 阶段模型 分布模型 配位数

**第一作者简介** 罗明高 男 1958 年出生 教授 从事沉积和储层地质学教学和科研工作

**中图分类号** P618.130 **文献标识码** A

## 1 前言

油气聚集是石油地质学的核心内容, 是形成油气藏的基本的必要条件<sup>[1]</sup>, 为此油气运移聚集机理的研究一直受到广大石油地质工作者的高度重视。早在 1954 年, Guess<sup>[2]</sup>就研究了油气在单一圈闭和系列圈闭中的聚集规律, 为石油地质理论奠定了基础, 逐渐形成了油气藏形成、分布规律的理论体系。

传统石油地质理论认为: 油气在单一圈闭中聚集时, 由于重力分异作用, 气、油、水各自分布在圈闭的上、中、下部; 油气在一系列溢出点高度不同的圈闭中聚集时, 从低往高处不同圈闭中依次为气、油、水。

随着不同油气藏勘探的不断深入、油气藏类型的不断丰富、储层地质学的成熟, 传统石油地质学理论的一些基本概念、理论需要进一步更新、发展、补充和完善。本文仅从油气储层孔隙结构特征入手, 从理论上探讨油气聚集和分布的定量模型。

## 2 油气聚集的微观过程

油气聚集是指油气在储层微观孔隙中不断充满的过程, 这一过程也是油气不断进入大小不同的孔隙和喉道的过程, 它与油气运移不同在于前者不仅通过较大的喉道进入孔隙, 而且也进入较小的喉道连接的孔隙(图 1)。

### 2.1 油气聚集过程

油气聚集是由于促使油气流动的力增大, 当油

气受浮力或水动力合力的作用而在储层中向上或上倾方向运移时, 如果其运移的前方受阻力的影响, 而不能继续运移时, 油气在储层中聚集起来。其聚集过程为: 油气首先在运移通道中聚集(停留), 然后随着驱动力的增大, 油气进入次一级喉道连接的孔隙中, …, 直到驱动力与储层中某类较小的喉道的毛管阻力平衡时, 油气再也不能进入这些小喉道所连接的孔隙时, 油气达到极限饱和度。

通常定义油气不能进入最小喉道(油气可进入的最小喉道)为临界喉道。油气进入的孔隙和喉道和体积与总孔隙和喉道的体积之比为原始油(气)饱和度。

油气运移时所需的油气最小饱和度为运移饱和度和。影响运移饱和度大小的因素很多, 主要有: 孔隙和喉道的大小, 分布及配位数。

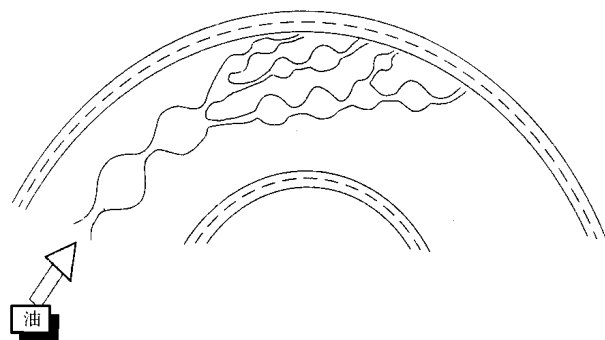


图 1 油气聚集微观模式图

Fig. 1 Microscopic model of hydrocarbon accumulation

① 国家“863”项目(863-306-04-03-1A)资助

收稿日期: 1999-05-06 收修改稿日期: 1999-06-30

Chatais 和 Dullien 等用计算机方法模拟二维和三维网络系统后得到孔隙中流体的连通特征。根据对各种不同理想网络模型中运移饱和度与配位数的关系研究发现,运移饱和度  $S_{\min}$  与配位数  $Z$  之积为一个常数,即

$$S_{\min} \cdot Z = C$$

式中:

$C$ —常数,二维网络时为 2,三维网络时为 1.5

$S_{\min}$ —运移饱和度,小数

$Z$ —配位数,指连接孔隙的喉道个数

当配位数为 2 时,几乎流体要充满所有的孔隙空间才会向前运移,因此在相同的孔喉大小条件下,其运移的速度较高;相反配位数越大运移越慢。

运移饱和度还反映了储存层原始含油饱和度的大小,原始含油饱和度总是大于或等于运移饱和度,运移饱和度较大时,其原始含油饱和度易达到,当  $Z=2$  时,其原始含油饱和度等于运移饱和度,当配位数为 6 时,运移饱和度仅为 30%,必须经过油气的进一步聚集,才能达到较高的原始饱和度。

### 3 油气聚集的阶段模型

油气在圈闭中聚集的过程是油气藏不断充满、最终形成的过程。油气藏的形成过程是在地质历史时期的一个漫长、缓慢的地下流体不断渗流的动态过程,根据油气聚集过程中,对油气藏形成质量的控制作用,可将油气聚集过程分为三个不同的阶段。

#### 3.1 早期阻运阶段

指油气运移前沿受(圈闭遮挡)阻止,而开始(在圈闭中)聚集的时期。此阶段的特点为油气的聚集刚由二次运移为聚集,油气在圈闭中的聚集量为运移时形成的连续状油带,其饱和度在数值上近似等于油气运移饱和度,微观含油气为运移通道上的孔隙和与之相连的两个喉道含有油,其他孔隙和喉道不含油气(图 2)。含油特征在剖面上的变化规律与储层性质密切相关:均质储层的剖面含油性为均质,即在圈闭的底部和顶部含油饱和度相同;底部较顶部好的正韵律储层剖面上,含油饱和度表现为底部含油饱和度较顶部高的特征,这与通常的“顶部较底部高”的石油地质概念相反;顶部较底部好的反韵律储层剖面上,含油饱和度表现为与均质剖面相同的特征,即在圈闭的底部和顶部含油饱和度相同。

#### 3.2 中期初聚阶段

指油气已在圈闭中聚集,并形成完整的油

藏剖面的时期。此阶段的特点为:油气在圈闭中不断聚集,从而形成了一个具有含油气边界、油水过渡带的完整剖面;在圈闭顶部含油饱和度已达到油藏原始含油饱和度,油水过渡带长,且位置高于圈闭溢出点高度,故油柱高度小于圈闭闭合度。微观含油特征为:圈闭中下部(油水过渡带以下)仅在运移通道上的孔隙和与之相连的两个喉道含有油,其他孔隙和喉道不含油气,而在圈闭的中上部(油水过渡带以上)的孔隙和喉道中部分或完全充满。含油特征在剖面上的变化规律与储层性质十分密切:均质储层和反韵律储层的剖面含油性为顶部含油较底部好,即在圈闭顶部的含油饱和度高于底部含油饱和度,反韵律储层的剖面表现更强烈;底部较顶部好的正韵律储层剖面上,含油饱和度表现为底部和顶部含油饱和度高,中部含油饱和度低的特征。

#### 3.3 晚期充满阶段

指油气已将圈闭充满,并形成完整的油藏的时期。此阶段的特点为:油气在圈闭中不断聚集的结果使圈闭充满;要圈闭中上部含油饱和度已达到油藏原始含油饱和度,油水过渡带短,且位置接近圈闭溢出点高度,故油柱高度接近圈闭闭合度。微观含油特征为:圈闭中上部(油水过渡带以上)的孔隙和喉道中部分或完全充满。含油特征在剖面上的变化规律与储层性质十分密切:均质储层和反韵律

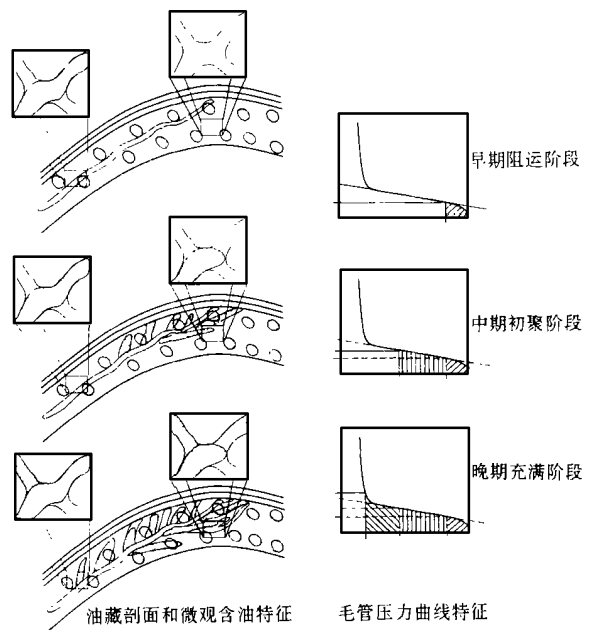


图 2 均质储层油气不同聚集阶段模式图

Fig. 2 Models of different stages of hydrocarbon accumulation in homogeneous reservoir

储层的剖面含油性为顶部含油较底部好,即在圈闭顶部的含油饱和度高于底部含油饱和度,反韵律储层的剖面表现更强烈;底部较顶部好的正韵律储层剖面上,含油饱和度表现为下部和上部含油饱和接近、或下部略高于上部、或下部略低于上部,与非均质程度密切相关。

### 4 单一圈闭中油气聚集分布模式

#### 4.1 均质储层中的分布模式

假设孔隙系统为等大球体堆积形成的,其可能形成的喉道半径大小为三种。

当储层中的孔隙结构特征为均质时,即在各不同部位的孔喉分布特征曲线完全相同(毛管压力曲线特征完全相同)时,油气在储层中的聚集特征与压汞或其它毛管压力曲线特征相似,即在油藏中含油(气)饱和度的变化与深度相关或油(气)柱高度直接相关。在油(气)藏底部(油水界面附近)含油饱和度低,而在油(气)藏顶部含油(气)饱和度高(图 3)。这是不同的油(气)柱高度的临界喉道下限大小不同的结果。

当储层的孔隙结构特征随着不同的深度和平面位置而发生变化时,其含油饱和度的变化特征将变得十分复杂。

#### 4.2 正韵律储层中的分布模型

假设储层孔隙结构特征在储层中主要有三种类型(图 4)。

当三种不同类型孔隙结构的储层在纵向上,从下而上以渐差顺序排列时,其原始含油饱和度的变化从下往上逐渐降低的特征分布。如图示为 70%、60%和 50%三种不同的类型。

在同一油(气)柱高度上,三种不同孔隙结构储层的含油气饱和度也不相同。

此时原始含油(气)饱和度随油柱高度的变化可能为反比的关系特征。

当各类间的差别越大时,这种反比关系特征越明显,差别较小时,这种反比关系越弱,甚至不存在;差别更小时将转化为正比的关系特征。

#### 4.3 反韵律储层中的分布模型

当孔隙结构的类型排列与上述相反时,油(气)柱高与含油(气)饱和度之间的关系出现强烈的正相关,其斜率大于任何一种孔隙结构的曲线的值(图 5)。

综上所述,当储层中微观孔隙结构为均质分布

时,含油(气)饱和度的特征与储层孔隙结构特征曲线有相似的正比关系;储层微观非均质特征使这种关系发生变化,当孔隙结构的类型正向排列(下好上差)时,含油饱和度与油(气)柱高度的正比关系减弱,甚至成反比;当为逆向排列时,这种正比关系增强;当其排列为无序时,则这种相关性变得十分复杂。

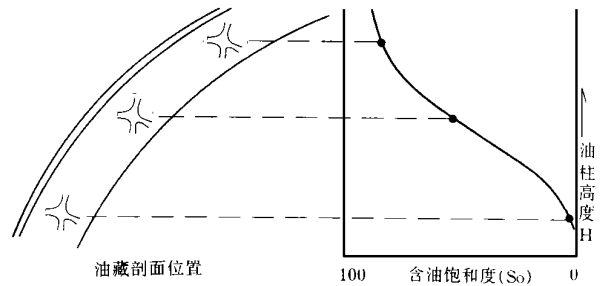


图 3 均质储层中的油气聚集特征  
Fig. 3 Hydrocarbon accumulation features in homogeneous reservoir

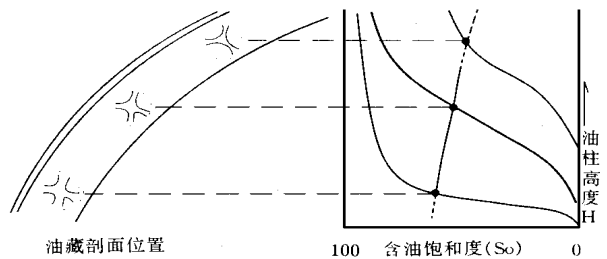


图 4 正向排列储层中的油气聚集特征  
Fig. 4 Hydrocarbon accumulation features in normal graded reservoir

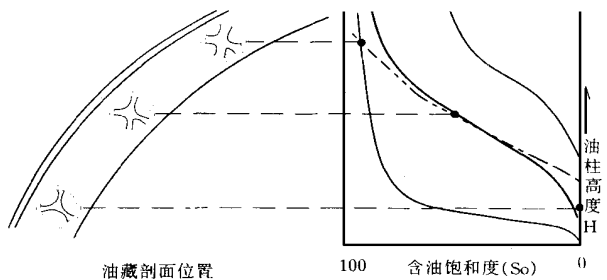


图 5 逆向排列储层中的油气聚集特征  
Fig. 5 Hydrocarbon accumulation features in reverse graded reservoir

### 5 不同组合圈闭中油气分布模型

#### 5.1 隔(夹)层影响模型

图6表明了发育不连续隔层对油气聚集非均质性的影响,正韵律时将储层发生微观孔隙结构变化处聚集部分油气,或在岩性(物性)变差部位聚集油气。其定量特征为当隔层面没有形成有效的遮挡时,油气将沿其上倾方向继续运移,阻止了油气继续往储层顶部的运移,不利于油气的聚集和形成油气藏;反之如果隔层面形成了有效的圈闭,则油气可能

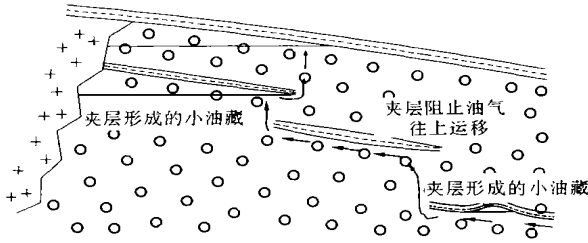


图6 隔层对油气聚集的影响

Fig. 6 The influences of intercalated beds on hydrocarbon accumulation

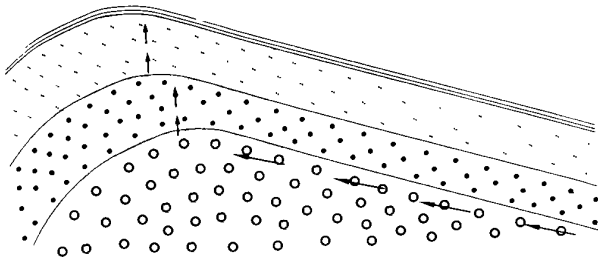


图7 正韵律时含油饱和度的分布模型

Fig. 7 Distribution model of oil saturation in normal graded reservoir

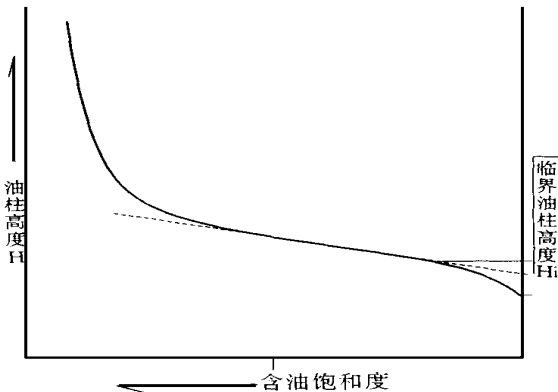


图8 临界油柱高度

Fig. 8 The critical height of oil column

在其中聚集形成油气藏,从而可能形成若干较小的油气藏。实际上,如果夹层在水平面上的投影连续时,在阻止油气往储层顶部运移的作用是与隔层相似,但在聚集油气时,其形成的油气藏规模较前者小(如图6所示)。

#### 5.2 正韵律排列模型

其特征为在储层分界处可形成储型油藏(如图7所示),通常只有在两种储层的孔隙结构特征差异较大时,才能形成这种油藏,其定量模型为:

假设形成的油藏高度为  $H_i$ , 则有:

$$H_i = 10 \times (1/r_{i-1} - 1/r_i) \Delta \rho$$

式中:

$H_i$ —第  $i$  类储层型油藏高度, m

$r_{i-1}$ —第  $i$  类储层之上的储层孔喉半径,  $\mu\text{m}$

$\Delta \rho$ —油水密度差  $\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{油}}$

$r_i$ —第一类储层的孔喉半径,  $\mu\text{m}$

形成储层型油藏的首要条件为,  $H_i > H_i^*$ , 即

$$10 \times (1/r_{i-1} - 1/r_i) \Delta \rho > H_i^*$$

$H_i^*$  称为临界油柱高度, 可通过储层毛管压力曲线确定, 如图8所示。

#### 5.3 单元连通性影响模型

单元连通性对油气聚集的影响也十分明显, 如图9所示。其特征为当不连通单元的接触窗在储层的上方时, 这种不连通性实际上破坏了圈闭的遮挡, 不能形成圈闭或使圈闭容积减小(闭合度减小), 这不利于油藏(特别是大油藏)的形成。

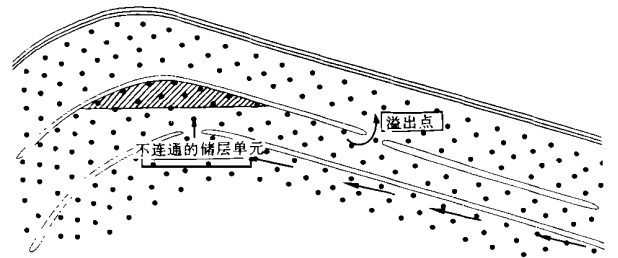


图9 单元连通性的影响模型

Fig. 9 A sketch map illustrating the influences of interconnected reservoir units

#### 5.4 非均质组合模型

曲型的情况如储层单元内依次有四种不同类型的微观孔隙结构特征时, 各种不同类型的储层微观特征控制了储层的含油性。

当储层中各微观单元为纵向上正排列。表现为正韵律时, 将会出现底部含油饱和度高, 顶部底低的

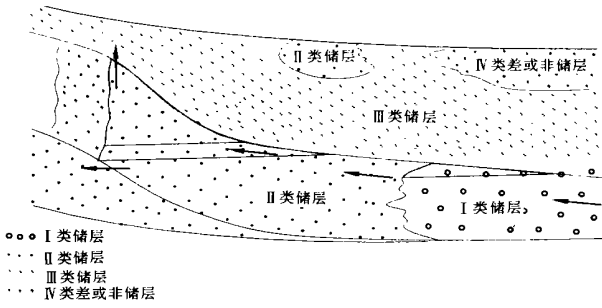


图 10 非均质性储层中油气分布模型

Fig. 10 Hydrocarbon distribution model in heterogeneous reservoir

特征: 如果为逆向排列, 反韵律的排列特征时, 将出现顶部含油饱和度高, 而底部含油饱和度低的特征。

实际中由于相变及各带范围的不同, 不管是在平面上还是剖面上都出现比较复杂的含油饱和度特征。

图 10 为一个宏观单元内的微观孔隙结构类型分布的模型, 假定一类储层的排列驱压力为 0.8MPa, 第二类为 1.5MPa, 第三类为 5.0MPa, 第四类为 7.0MPa, 油气进入一类储层到达与二类和三类的交界处时, 虽然三类在一类正上方, 但二类的毛管阻力更小, 因此, 油气沿侧面储层向前运移至二类储层中聚集。

因此油气聚集的第一阶段为一类和与一类相连的二类储层的上倾部位; 随着油柱高度的增加, 油气既可能由一类储层向三类储层运移聚集, 也可能在二类储层聚集; 若为前者, 则油气将由三类储层运移而在其中包含的二类储层中聚集, 在三类储层中仅为运移饱和度, 二类储层中的饱和度将大于三类储层中的值; 对于后者, 则三类储层可能不含油, 而形

成较好储层中不含油, 较差的储层中含油的非均质特征。

### 6 结论

(1) 油气聚集是油气在储层微观孔隙中不断充满的过程。这一过程也是油气不断进入大小不同的孔隙和喉道的过程。

(2) 储层原始含油饱和度总是大于等于运移饱和度, 而运移饱和度大小与配位数大小成反比

(3) 油气聚集可划分为三个不同的阶段模型。根据油气聚集过程中, 对油气藏形成质量的控制作用, 可将油气聚集过程分为早期阻运、中期初聚、晚期充满三个不同的阶段。

(4) 油气在均质储层中的聚集特征与毛管压力曲线特征相似。在油藏中含油饱和度的变化与深度相关或油柱高度正相关, 即在油藏底部(油水界面附近)含油饱和度低, 而在油藏顶部含油饱和度高。

(5) 油气在非均质储层中的聚集特征十分复杂。既可形成油藏底部含油饱和度低、油藏顶部含油饱和度高的常规特征; 也可形成油藏中下部含油饱和度较高、油藏上部含油饱和度高的反常特征, 它与储层内部组合特征相关。

(6) 油气在系列圈闭中聚集与储层宏观的多因素相关。影响油气聚集的宏观特征包括隔夹层、不同孔隙结构类型排列组合特征、储层连通性等。

### 参 考 文 献

- 1 罗明高. 定量储层地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 115~129
- 2 潘中祥. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986. 185~195

# A Quantitative Microscopic Model of Hydrocarbon Accumulation

LUO Ming-gao HUANG Jian-quan TANG Hong

(Southwest Petroleum Institute Nanchong Sichuan 637001)

## Abstract

Because both migration and accumulation of oil and gas proceeded within the pore space of reservoir, the porosity structures directly have an effect on the accumulation of oil and gas as well as the formation and distribution of oil and gas reservoirs.

Based on pore microstructure, the microscopic process of hydrocarbon accumulation is quantitatively studied by proposing three stages and relevant concepts models, which includes early migration with resistance force, interim accumulation and late filling.

Several models of hydrocarbon accumulation and distribution are also presented respectively according to the related serial complex traps and simple traps that are composed of various porelevel heterogeneous reservoirs. In homogeneous reservoir hydrocarbon accumulation is similar to capillary pressure curve and the change of oil saturation in reservoir directly has something to do with depth or height of oil column, it is also to say that oil saturation on the bottom of reservoir (nearly from the oil-water contact) is lower, while oil saturation on the top of reservoir is higher. In heterogeneous reservoir, the features of hydrocarbon accumulation are very complex, and, sometimes, it has regular features that oil saturation on the bottom of reservoir (nearly from the oil-water contact) is lower, while oil saturation on the top of reservoir is higher, but sometimes it has contrary ones, because of characteristics of internal combination in reservoir. In serial traps hydrocarbon accumulation has something to do with lots of macroscopic factors of reservoir that includes intercalated beds, different graded combination of pore structure type, connectedness of reservoir and so on.

The conclusion makes a good complement to the traditional theories of petroleum geology. The study is also proved a successful attempt in quantitative geology.

**Key words** hydrocarbon accumulation microstructure quantitative model microscopic process stage concept model distribution model coordination number