

[引著格式] 刘媛, 唐资昌, 黄力, 等. 利用 J-函数计算油藏原始饱和度的可行性分析 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (11+12): 13~17.

# 利用 J-函数计算油藏原始饱和度的可行性分析

刘媛, 唐资昌, 黄力, 牛志文

(中石油东方地球物理公司研究院, 河北 涿州 072751)

李艳静, 陈旭, 刘翠凤

**[摘要]** 从 J-函数求取原始饱和度的理论依据出发, 对油藏饱和度的诸多控制因素——含油高度、孔隙结构、油藏类型及流体性质等进行综合分析。结果表明: 同一油藏内部, 储层物性相近的条件下, 自由水面以上随着含油高度的增大, 原始含油饱和度逐步增大; 对于不同油藏, 储层的孔喉半径越小, 弯曲度越大, J-函数随之增大, 原始含油饱和度减小; 同时, 油藏的油水关系越复杂, 流体性质变化越多样, 亦会影响 J-函数的适用性。通过实例分析得出, 利用 J-函数计算原始饱和度的方法并非无条件适用于所有的油藏类型, 该方法对块状底水油藏具有良好的适用性, 对层状边水油藏计算所得的含油饱和度偏低, 不能真实反映油藏内部饱和度的变化规律, 适用性较差。

**[关键词]** J-函数; 原始饱和度; 含油高度; 孔隙结构; 油藏类型

**[中图分类号]** P631.84 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 11+12-0013-05

油藏的原始饱和度是油藏表征的一项重要参数, 除了定性评价储层含油性、确定油水关系外, 该参数的准确性直接影响到石油原始地质储量的定量计算, 尤其对油藏三维地质建模饱和度场的模拟及开发方案的编制至关重要, 因此越来越受到广大石油工作者的关注。Leverett<sup>[1]</sup>于 1941 年提出了 J-函数的概念, 该函数只与储层的孔隙度、渗透率、油藏的油水性质及油柱高度相关, 减少了传统方法中饱和度值对电阻率曲线、测井解释参数及模型的依赖, 使其更符合地质分布规律。但实践证明, 利用 J-函数计算原始饱和度的方法并非无条件适用于所有的油藏类型, 需要谨慎处理。因此, 笔者通过对相关参数的综合分析, 以 M 油田 2 个不同类型的油藏为例探讨该方法的可行性与适用性。

## 1 J-函数理论依据

自然条件下, 油气运移的过程是油气通过克服毛细管压力而被水排驱最终达到平衡的过程, 油藏中原始油水分布状态是驱动力 (即浮力) 与毛细管压力平衡的结果<sup>[2]</sup>。因此, 毛细管压力与油水重力差的关系为:

$$p_c = \frac{(\rho_w - \rho_o)gH}{140000} \quad (1)$$

式中:  $p_c$  为毛细管压力值, psi (1psi=6894.757Pa);  $\rho_w$ 、 $\rho_o$  分别为水、油的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, 9.8m/s<sup>2</sup>;  $H$  为油藏自由水面以上的高度, 即含油高度, m。

依据 Leverett 关于 J-函数的理论, 对于同一油藏条件下的 J 函数与毛细管压力具有相同的分布特征<sup>[3]</sup>, 即:

$$J = \frac{p_c}{\sigma \cos \theta \sqrt{K/\phi}} \quad (2)$$

**[收稿日期]** 2015-02-22

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目 (41202088)。

**[作者简介]** 刘媛 (1982-), 女, 博士, 工程师, 主要从事岩石物理及测井解释工作, liuyuan08@cnpc.com.cn。

式中： $J$  为 J-函数； $\sigma$  为界面张力，mN/m； $\theta$  为润湿角，(°)； $K$  为渗透率，mD； $\phi$  为孔隙度，%。

通过实验室条件下获得的毛细管压力曲线，再根据式 (2) 可求得实验室条件下对应含水饱和度的 J-函数。若将油藏条件下的各项参数代入实验室条件下的 J-函数，可求得油藏条件下的 J-函数。将式 (1) 代入式 (2)，即可获取饱和度与含油高度之间的关系式，可求取油藏内部任一高度位置处的原始含油饱和度：

$$S_w = \left( \frac{1}{C} \frac{(\rho_w - \rho_o)gH}{\sigma \cos\theta} \sqrt{K/\phi} \right)^{1/D} \quad (3)$$

式中： $C$ 、 $D$  为回归系数； $S_w$  为油藏的原始含水饱和度，1。

利用 J-函数求取原始饱和度的方法，目的在于消除测井解释过程中电阻率曲线、解释参数及模型的影响，使饱和度值的分布更符合油气充注模式及地质规律。

## 2 J-函数的相关参数分析

影响油藏原始饱和度分布的主要因素包括含油高度、储层孔隙结构、油藏类型、流体性质等<sup>[4~7]</sup>。J-函数是把上述因素的影响综合在一起来表征油藏毛细管压力曲线特征的函数，所以上述因素亦是 J-函数的重要影响因素。

### 2.1 含油高度

同一油藏内部不同位置处的原始饱和度受含油高度（即油层距离自由水面的高度）、孔隙结构特征及流体密度差等因素控制。沿自由水面向上，随着  $H$  的增加，浮力增加，油气逐步充注到更小的孔隙喉道中，原始含油饱和度增大，含水饱和度减小，所以整个油藏不同高度上的原始饱和度是不同的。

多数情况下，油藏中从纯油段到纯水段之间存在一个油水过渡带，沿自由水面向上 ( $S_w = 1$ )， $S_w$  逐渐减小，含油饱和度 ( $S_o$ ) 逐渐增大，当  $S_w$  减小至临界含水饱和度 ( $S_{w,cutoff}$ ) 时，所对应的海拔深度即纯油层的底界，此时得到最小临界含油高度 ( $H_{min}$ )，也是油水过渡带的厚度。沿此继续向上， $S_w$  继续减小， $S_o$  继续增加，当油层中只存在束缚水， $S_w$  等于束缚水饱和度 ( $S_{wi}$ )， $S_o$  基本上达到最高值 ( $S_o = 1 - S_{wi}$ ) 时，此时得到最大临界含油高度 ( $H_{max}$ )。此后，随着  $H$  再增加， $S_w$  变化很小，趋于稳定（见图 1）。所以，利用 J-函数计算的油藏原始饱和度对  $H$  具有限制条件， $H_{min}$ 、 $H_{max}$  分别对应 J-函数使用条件的最小与最大临界含油高度，当油藏的含油高度过小或过大时，该方法求得的饱和度值均不能完全真实反映油藏的饱和度分布情况。

根据式 (3) 变换得到  $H_{min}$ ：

$$H_{min} = \frac{CS_{w,cutoff}^D \sigma \cos\theta}{(\rho_w - \rho_o) \sqrt{K/\phi}} \quad (4)$$

同理，变换得到  $H_{max}$ ：

$$H_{max} = \frac{CS_{wi}^D \sigma \cos\theta}{(\rho_w - \rho_o) \sqrt{K/\phi}} \quad (5)$$

### 2.2 孔隙结构

利用 J-函数求取油藏原始饱和度的方法，在一定程度上降低了饱和度对孔隙度和渗透率的依赖，但孔隙结构依然是非常重要的参数之一。孔喉半径的大小及分布是决定毛细管压力曲线的重要地质因素<sup>[8]</sup>。

不同储层的 J-函数不同，充注相同含油饱和度所需的油柱高度亦不同，储层物性越好，所需油柱高度越小（图 1）。这是因为当储层中孔喉半径 ( $\gamma$ ) 越小，弯曲度越大，毛细管的排替压力就越大，J-函数随之增大，储层中束缚水饱和度增大，含油饱和度减小；反之，孔喉半径越大，毛细管的排替压力越小，J-函数随之减小，含油饱和度增大。随着孔喉半径的逐渐增大，J-函数快速减小，当孔喉半径增大到一定程度时，J-函数逐步趋于稳定，变化不明显（图 2）。

实际油藏的储层空间类型多样，储层非均质性非常复杂，孔喉半径不可能呈均匀分布，加之实验室内岩心样品点的局限性，只能通过样品的平均效应来表征实际油藏，即把孔隙结构特征( $\sqrt{K/\phi}$ )相近的毛细管压力曲线平均为一条能够代表油藏储层特征的毛细管压力曲线，才有利于求准原始饱和度。

### 2.3 油藏类型

利用 J-函数计算原始饱和度的方法认为，油水分布现状是以浮力为主要动力和毛细管力为主要阻力平衡的结果，所以该方法适用于以浮力为主要驱动力的且具有足够圈闭闭合高度的油藏，例如 M 油田 B 层的块状底水油藏。

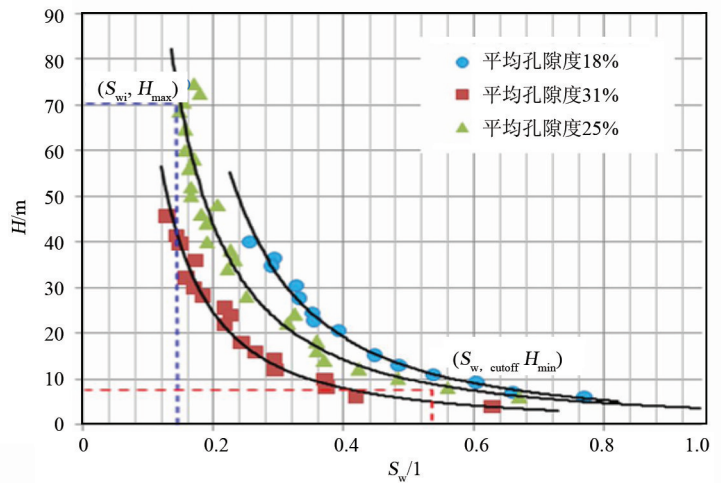


图 1 不同储层的  $S_w$ - $H$  关系图

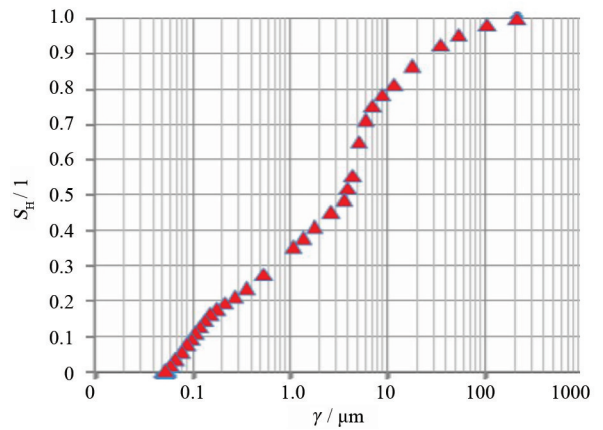
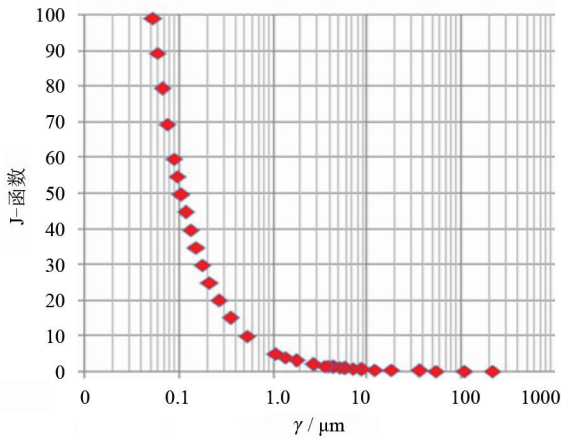


图 2 实验室条件下  $\gamma$  与 J-函数及汞饱和度 ( $S_{Hg}$ ) 的关系

但实验分析认为，油气运移的动力机制比较复杂，可能来自多个方面，可以是构造应力、浮力、水动力、热动力或毛细管力等的一种或几种力。而浮力、水动力、毛细管力不足以实现油气的游离相运移，而渗透搬运才是多孔地层中油气运移的真正动力<sup>[9~11]</sup>。在此情况下，该方法不能用于原始饱和度的计算，所得的原始含油饱和度偏低，例如 M 油田 A 层的层状边水油藏。

另外，J-函数描述的是油藏的原始状态，所以应充分考虑油藏的成藏史、构造演化史等<sup>[7,10]</sup>。若油藏成藏较晚，或者从成藏至现今构造运动变化不大，该方法适用；若构造运动频繁，成藏期次多，油藏现今状态与原始状态不完全一致甚至相差甚远，该方法有

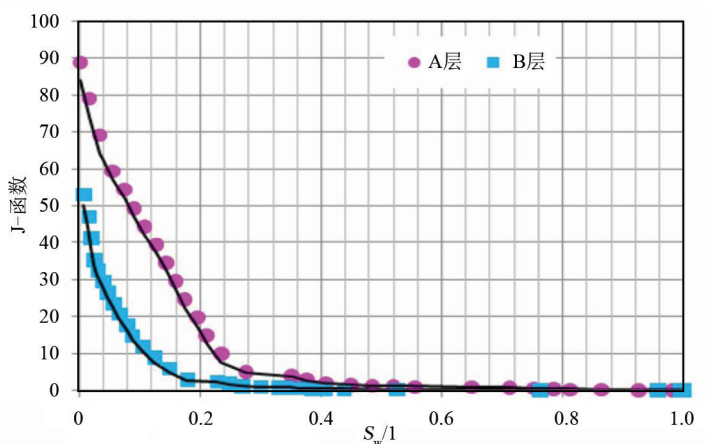


图 3 实验室条件下 A 层及 B 层的  $S_w$  与 J-函数之间的关系

该方法有

待于商榷。

## 2.4 流体性质

成藏条件下的  $\rho_w$ 、 $\rho_o$  及油水  $\sigma$  及  $\theta$  等参数无法由实验室内分析化验精确获得。对于油水关系简单、流体性质均一的块状油藏而言，上述参数可根据具体情况进行校正获取，但对油水关系复杂、流体性质差异大的层状油藏则难以得到，也会直接影响到 J-函数的适用性。

# 3 实例分析

## 3.1 块状底水油藏

M 油田 B 层为典型的块状底水油藏，具有统一的油水界面，含油高度约为 82.0m。从区域成藏角度来看，大规模断裂是油气纵向运移的主要通道，背斜、反向断块和断鼻是油气富集的主要构造单元。储层为辫状河沉积的粗粒砂岩，砂体连通性好，平均孔隙度为 32.5%，渗透率为 1712.0mD，为典型的高孔、高渗储集层，意味着阈压低，油气充注效率高。

根据实验室的毛细管压力分析数据，获得 B 层在油藏条件下的 J-函数，建立  $S_w$  与  $H$  之间的关系（见图 3）：

$$J = 0.183 \times S_w^{-1.99} \quad (6)$$

$$S_w = [5.76 \times 10^{-6} (\rho_w - \rho_o) g H \sqrt{K/\phi}]^{-0.5} \quad (7)$$

通过对比发现，对于 B 层油藏，利用 J-函数计算得到的含水饱和度 ( $S_{w,J}$ ) 与测井解释得到的含水饱和度 ( $S_{w,L}$ ) 具有良好的一致性（图 4 (a)），表明 J-函数对于块状底水油藏具有很好的适用性，可以合理反映该油藏内部原始饱和度的分布规律，可用于地质建模中以获得合理的饱和度场。

## 3.2 层状边水油藏

M 油田的 A 层为三角洲前缘沉积背景下的层状边水油藏，具有明显的砂泥岩互层沉积特征，稳定的泥岩层对储集层的侧向和垂向有效封堵，是形成油藏的决定因素；同时，该油藏是多期构造运动改造的结果，在古隆起带的高部位，具有整体含油、分散成藏的特点。A 层在纵向上存在多个油水系统，单个油藏的含油高度约 10m。储层的平均孔隙度为 18.7%，渗透率为 10.9mD，属于中孔、低渗储集层。阈压相对高，油气充注效率低。

同理，获得 A 层在油藏条件下的 J-函数，建立  $S_w$  与  $H$  之间的关系（见图 3）：

$$J = 0.465 \times S_w^{-1.63} \quad (8)$$

$$S_w = (2.61 \times 10^{-6} (\rho_w - \rho_o) g H \sqrt{K/\phi})^{-0.61} \quad (9)$$

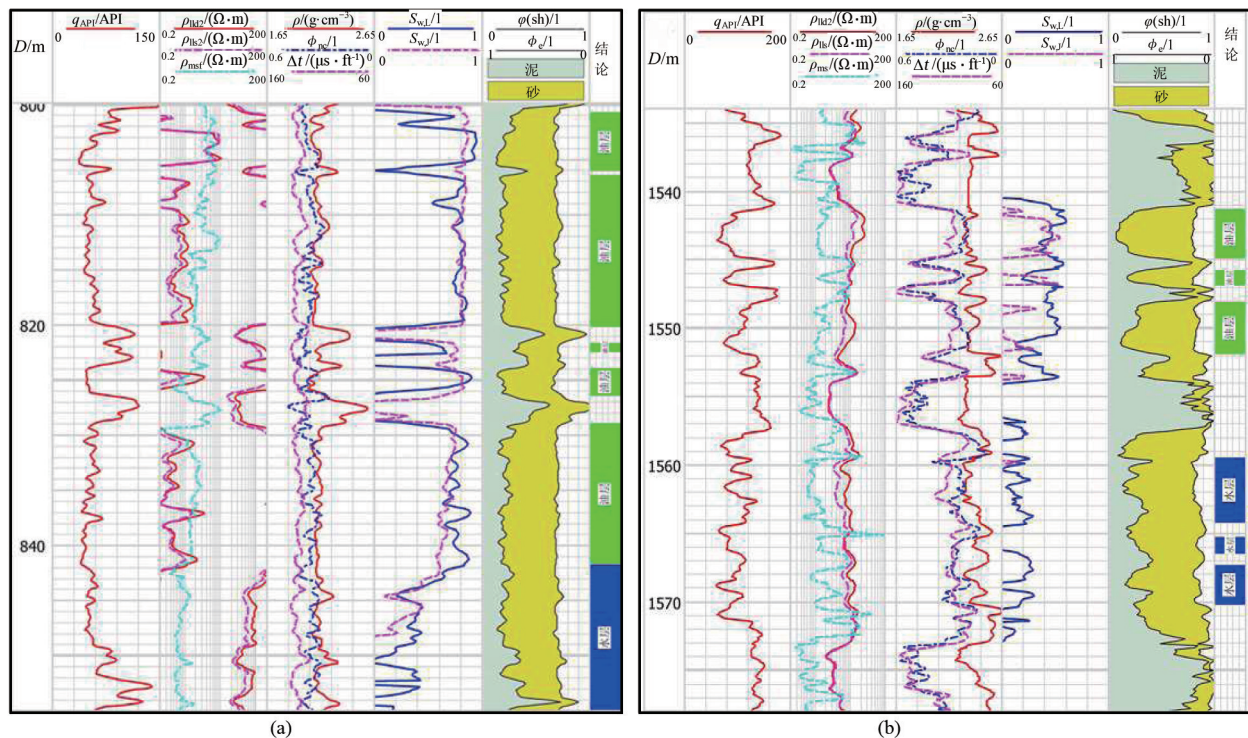
通过对比发现， $S_{w,J}$  明显小于  $S_{w,L}$ （见图 4 (b)），表明在油气差异聚集过程中，浮力并非油气运移的主要动力。J-函数不能合理反映油藏内部原始饱和度的分布规律，不适用于层状边水油藏，更不可用于地质建模中以获得合理的饱和度场。

# 4 结论与认识

1) 当油藏的含油高度过小或过大时，J-函数不能完全真实反映油藏的饱和度分布情况。对于闭合高度足够大的油藏，沿自由水面向上，随着含油高度的增加，原始含油饱和度逐步增大。

2) J-函数对储层类型具有一定的适用性，该方法要求首先对储层进行详细分类，分别求取各类储层的 J-函数，才能有利于求准原始饱和度。储层孔喉半径越小，弯曲度越大，J-函数随之增大，束缚水饱和度增大，原始含油饱和度减小。

3) 实践表明，J-函数并非无条件适用于所有的油藏类型，对块状底水油藏具有良好的适应性，对层状边水油藏的适应性较差。



注：D 为井深； $q_{API}$  为自然伽马； $\rho_{HD2}$  为深双侧向电阻率； $\rho_{HS2}$  为浅双侧向电阻率； $\rho_{MSF}$  为微球形聚焦电阻率； $\rho_c$  为补偿密度； $\phi_{ne}$  为补偿中子孔隙度； $\Delta t$  为声波时差； $S_w$  为含水饱和度； $\phi(sh)$  为泥质体积分数； $\phi_e$  为有效孔隙度。

图 4 B 层 (a) 及 A 层 (b) 测井解释结果与 J-函数计算结果对比

[参考文献]

[1] Leverett M C. Capillary behavior in porous solids [J]. Transactions of the AIME, 1941, 142 (1): 151~169.  
 [2] 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
 [3] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 山东: 中国石油大学出版社, 2001.  
 [4] 管耀. 利用毛细管压力资料求原始含油饱和度方法探讨 [J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32 (5): 365~369.  
 [5] 梁忠奎, 周灿灿, 杨春梅, 等. 利用炆柱高度计算含油饱和度在低阻油层中的应用 [J]. 国外测井技术, 2010, 175: 40~42.  
 [6] 吕鸣岗, 毕海滨. 用毛细管压力曲线确定原始含油饱和度 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23 (5): 63~66.  
 [7] 林会喜. 应用毛细管压力资料求取含油饱和度应注意的问题——以济阳坳陷罗家油田为例 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10 (1): 17~19.  
 [8] 郭晓博. 采用孔隙体积法计算平均毛细管压力曲线 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (11): 4514~4121.  
 [9] 曾溅辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.  
 [10] 赵国欣, 朱家俊, 关丽. 用毛细管压力资料求取原始含油饱和度的方法 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2008, 32 (4): 38~41.  
 [11] 郝雪峰, 尹丽娟. 油藏类型与属性的动力学涵义 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20 (2): 1~5.

[编辑] 龚丹