

圈闭资源量参数概率分布及有效性检验

黄学斌,李 军,闫相宾,蔡利学

(中国石化 石油勘探开发研究院,北京,100083)

摘要:概率统计法是目前圈闭资源量计算的最有效方法,其计算结果的大小、精度与合理性受各资源量参数的概率分布所决定。因此,如何构建适合不同地区、不同领域圈闭的资源量参数概率分布,并通过合理的有效性检验以证明其可靠性,是概率统计法应用的关键。基于勘探风险分析思想,建立了圈闭资源量参数概率分布构建及检验流程,并给出了相应的资源量参数不确定性分析方法。其中,有针对性地提出将数学假设检验方法应用于圈闭资源量参数模型的有效性检验之中,并根据资源量参数的地质和数学特征,建立了相应数学假设检验流程。最后,以我国东部某预探圈闭为实例,阐述了上述流程和方法的应用过程。实例结果表明,利用上述方法可以有效地实现资源量参数概率分布的定量化分析,其资源量计算结果与该圈闭钻后预测储量规模基本吻合,验证了上述方法的可靠性与合理性。

关键词:不确定性;有效性检验;概率分布;资源量计算;勘探风险分析

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Probability distribution of parameters for trap resources assessment and its validation

Huang Xuebin, Li Jun, Yan Xiangbin, Cai Lixue

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Probabilistic statistics method is the most effective way to estimate trapped petroleum resources. However, the precision and rationality of the estimates depend on the probability distributions of parameters used for resources calculation. Therefore, establishing the probability distributions of the resources parameters suitable for traps of different types in different areas and making the rational validation check to prove their reliability have become the key points of the application of the probabilistic method. Based on risk analysis of exploration, this paper presented a workflow to establish and check probability distribution of the trap resources parameters, and an analytical method for determining the uncertainty of corresponding parameters. Meanwhile, the mathematical hypothesis check method was used to be applied into the validation check of the trap resources parameter models. According to the geologic and mathematic characteristics of the resources parameters, a corresponding mathematical hypothesis test workflow was also established. Finally, a pre-exploration trap in the east of China was taken as an example for illustrating the workflow and the application process of the method. The results show that the method can effectively realize quantitative analysis of the resources parameters. And the calculation results match well with the post-drilling predicted reserves, validating the reliability and the rationality of this method.

Key words: uncertainty, validation test, probability distribution, resources calculation, exploration risk analysis

估算圈闭资源量是开展圈闭评价优选的主要任务之一。尽管圈闭所蕴含的油气体积是客观存在的,但受到现有技术和经济条件限制,勘探阶段无法直接测量获得准确的油气体积,只能依靠间接手段获得圈闭相关地质参数,估算圈闭资源量大小。因此,合理地选择数学方法和估算参数,客观地定量评价圈闭的含油气规模是圈闭资源量估算的核心。

从不确定性的角度,圈闭的资源量估算方法可分为确定性方法和不确定性方法^[1-4](概率统计法)两大类。两者的主要区别在于前者在计算过程中只取每个参数

的最佳估算值,评估结果更为主观;后者将各个资源量参数视为随机变量,通过对其不确定性分析,最终得出资源量的概率分布,是一种典型的风险分析方法^[5-7]。

在油气勘探实践中,受到地质认识和资料程度的限制,圈闭资源量参数存在很大的不确定性^[8-13]。为了能更有效地掌控勘探风险,指导油气勘探决策,采用概率统计法进行圈闭资源量的计算显然更为客观。由于资源量计算结果的不确定性实际受其计算参数的不确定性支配,因此如何合理地对圈闭资源量参数开展不确定性分析,构建适合不同地区、不同类型圈闭的资

源量参数概率分布是概率统计法应用的关键。

1 资源量参数分布的构建及检验流程

不确定性作为油气勘探开发的固有属性^[14],同样贯穿于圈闭资源量参数分布的构建之中。为科学、合理地描述资源量计算参数的不确定性,本文借鉴风险分析技术^[15-16],提出了一套系统、完整的圈闭资源量参数概率分布构建及检验流程,如图1所示。相对于传统方法,该流程更注重参数概率分布的有效性检验。在以地质含义为判别依据的逻辑检验之上,进一步加入了基于拟合优度检验的数学假设检验方法,从而使建立的参数概率分布更加准确和客观。

2 资源量参数概率分布的构建

圈闭资源量参数概率分布的构建,其本质是一个以资源量参数样本为基础,从局部到全体的推论过程。该过程可以通过资源量参数样本数字特征计算、概率分布模型的选择以及概率分布模型的不确定性赋值三个步骤实现。

2.1 参数样本数字特征的计算

参数样本数字特征是指从统计学的角度,用于描述圈闭资源量参数样本的特征值。这些描述性的特征值是进行参数分布模型选择、有效性检验和不确定性

赋值的基础。常用的参数样本数字特征包括衡量数据集中趋势的众数、中位数,确定性方法中常用的平均数,衡量数据离散程度的方差以及样本的P10、P90值等。

2.2 概率分布模型的选择

2.2.1 资源量参数的概率分布模型

概率分布模型是用以表述随机变量取值的概率规律理论模型。在圈闭资源量计算中,应根据样本的统计情况,选择最能反映客观实际的参数概率分布模型。本文结合各种圈闭资源量参数的地学和数学特征,总结了圈闭资源量参数常用的概率分布模型及其适用性,如表1所示。

2.2.2 概率分布模型的选择方法

圈闭资源量参数概率分布模型的选择应以表1所示的常用概率分布模型为基础,结合目标圈闭的实际情况,从中优选出最适合的模型。其具体的选择方法如下:

1) 实际观测值法

当圈闭资源量参数样本达到一定数量时(例如正态分布通常要求样品数量至少达到15个),可以通过构建实际观测数据的频率直方图,直接判断参数模型的最优分布。由于地质勘探通常存在高度的不确定性,因此若样本的数量能够满足要求,且具有较好的代表性,使用实际观测值构建参数模型最能反映圈闭资源量参数的客观情况。

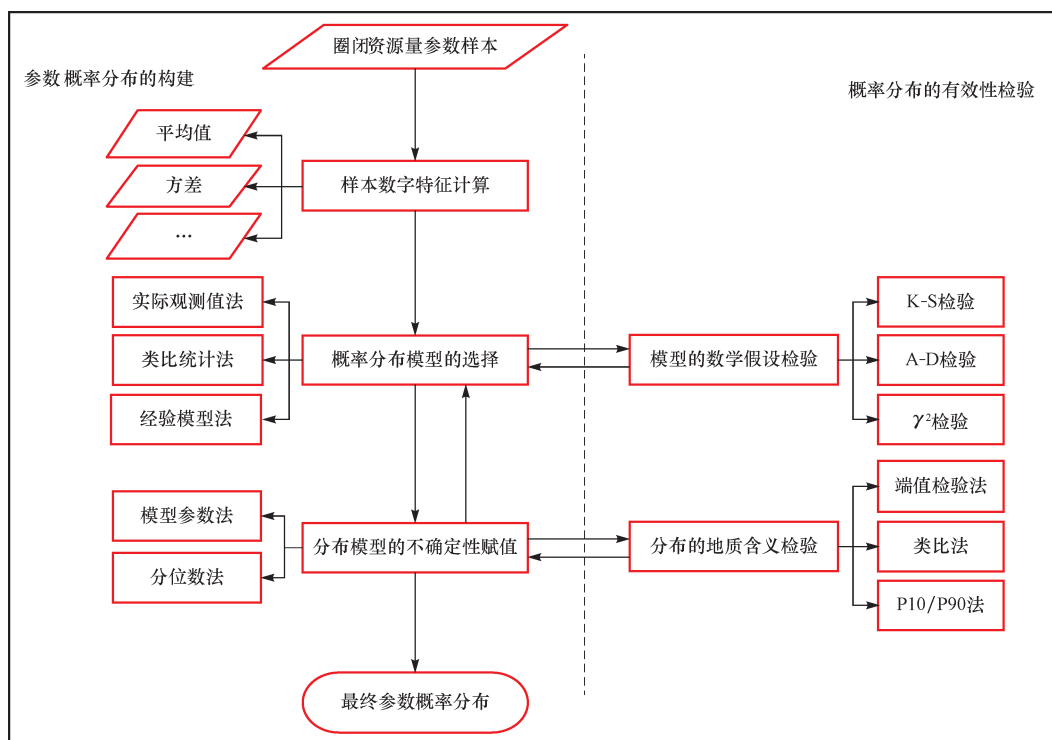


图1 资源量参数分布的构建及检验流程

Fig. 1 Establishment and validation workflow of resources parameter distribution

表 1 圈闭资源量参数常用的概率分布模型及适用条件

Table 1 Common probability distribution models and their application conditions of trap resources parameters

分布模型	分布曲线	模型参数	表达公式	性质	适用参数
正态分布		• 均值:μ • 标准差:σ	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	• 大多自然现象服从的分布 • 均值两侧具有对称性 • 众数、均值、中值相同	• 面积 • 有效厚度 • 孔渗饱等参数
对数正态分布		• 位置:L • 均值:μ • 标准差:σ	$f(x, L, \mu_{\log}, \sigma_{\log}^2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}(x-L)} e^{-\frac{[\ln(x-L)-\mu_{\log}]^2}{2\sigma_{\log}^2}}$	• 油气勘探领域最常用的分布 • 正偏斜式分布 • 均值 > 中值 > 众数	• 面积 • 有效厚度 • 孔渗饱等参数
Beta 分布		• 最大值:Max • 最小值:Min • Alpha:α • Beta:β	$f(x) = \frac{z(\alpha-1)(1-z)(\beta-1)}{\beta(\alpha, \beta)}$ 其中: $z = \frac{x - Min}{Max - Min}$	• 分布在 0~1 范围内 • 描述百分数的理想分布	• 充满系数 • 孔渗饱等参数
BetaPERT 分布		• 最大值:Max • 最小值:Min • 最可能值:$Likeliest$	$f(x) = \frac{(x - Min)^{\alpha-1} (Max - x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta) (Max - Min)^{\alpha+\beta-1}}$ 其中: $\alpha = 6 \left(\frac{\mu - Min}{Max - Min} \right), \beta = 6 \frac{Max - \mu}{Max - Min},$ $\mu = \frac{Min + 4 \times Likeliest + Max}{6}$	• 利用 Beta 分布方程代替众数两侧的线性外推 • 类似三角分布,但峰值下降得更平滑	• 面积 • 有效厚度 • 孔渗饱等参数
三角分布		• 最大值:Max • 最小值:Min • 最可能值:$Likeliest$ • $h = \frac{2}{Max - Min}$	$f(x) = \begin{cases} \frac{h(x - Min)}{Likeliest - Min} & (Min < x < Likeliest) \\ \frac{h(Max - x)}{Max - Likeliest} & (Likeliest < x < Max) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$	• 赋值简单方便 • 对尾部频数可能估计过高	• 面积 • 有效厚度

2) 类比统计法

当目标圈闭资源量参数缺乏样本数据,或者样本数据较少,无法反映目标客观情况时,可以通过研究与目标圈闭处于同一地区的已开发类比圈闭,统计类比圈闭资源量或储量计算参数的分布规律,代替目标圈闭的参数模型。油气勘探早中期的圈闭参数模型大多通过此种方法建立。

3) 经验模型法

在圈闭资源量参数缺乏样本数据,也无法找到合适的类比圈闭情况下,可以借鉴经验的统计模型,开展参数模型的选择。大量统计表明,圈闭含油气面积、有效厚度总体上符合对数正态分布或正态分布,孔隙度、饱和度、采收率通常符合 Beta 分布或对数正态分布。

此外,在参数模型的选择过程中,可以充分利用概率分布的数学性质辅助模型的选择。例如当随机过程由多个个别因素组成,根据中心极限定理可以认为其分布是正态的;多个正态分布相加,结果仍符合正态分布;多个对数正态分布相乘,结果仍符合对数正态分布等^[17]。而圈闭资源量计算的过程本身就可以看成是多个资源量参数相乘的结果。

2.3 参数模型的不确定性赋值

参数模型的不确定赋值是指利用已知的样本数据或人为设置的分位数,对选择好的参数模型进行赋值,

以得到最终的参数概率分布。

2.3.1 参数不确定性赋值的方式

参数不确定性赋值的方式可分为两大类,即模型参数法和分位数法。模型参数法首先通过样本数字特征计算,得到模型理论表达式中的各项参数(各模型对应的参数见表 1,例如正态分布的模型参数为均值 μ 和标准差 σ),再利用其对分布模型进行赋值。而分位数法是通过设置若干分位数(例如 P_{10}, P_{50}, P_{90} 等)值,利用分位数值间接计算模型理论表达式中的各项参数,已达到最终赋值的目 的。

2.3.2 不确定性赋值方式的选择

参数不确定性赋值方式的选择,应综合考虑样本的数量和取样情况。一般来说,在样本数量较多的情况下,应优先考虑模型参数法。该方法可以充分发挥样本的数量优势,直接通过样本信息计算模型参数值,获得较为精确的概率分布。但在其样本数字特征计算过程中,应考虑到样本的取样情况。例如,勘探早期成功的钻井取样可能带有倾向性,此类样品比例过高,可能导致乐观的预测结果^[18]。在样本数量较少的情况下,可以优先选择分位数法。该方法简单方便,对样本数量要求不高,但由于模型参数是通过两至三个样本分位数值间接计算,因此如果分位数值设置不当,可能

导致误差相对较大。

此外,在不同资源量参数赋值过程中,还应考虑到参数之间的相关性。通常,忽略参数之间的已存在的相关性,会导致计算结果的不确定性偏低。

3 参数模型的有效性检验

参数模型的有效性检验作用主要有两方面。一是为主观选择的参数模型进行客观的检验,验证参数模型的有效性;二是当模型选择比较困难时,借助有效性检验的指标值与假设模型进行对比,得到最优的分布模型。参数模型的有效性检验分为数学假设检验和地质含义检验两种。

3.1 数学假设检验

3.1.1 参数模型的拟合优度检验

参数模型数学假设检验方法是以统计学中的拟合优度检验为基础。所谓拟合优度检验,是指统计学中用来检验来自总体中的一类数据其分布是否与某种理论分布相一致的统计方法^[19-20]。相对于基于样本统计直方图的粗略判断,利用拟合优度检验等数学假设检验方法具有较为可靠的数学理论基础。将拟合优度检验应用到圈闭资源量参数的概率分布模型检验中,可以获得更加客观、准确和量化的参数分布结论。

统计学中的拟合优度检验方法有很多种,不同检验方法的检验侧重点各有不同,适用于不同的应用领域。结合资源量参数的特点,从各类拟合优度检验方法中优选出 K-S 检验、A-D 检验、 χ^2 检验作为圈闭资源参数概率模型的检验方法,并对其优缺点和适用性进行了总结,如表 2 所示。

表 2 资源量参数分布模型常用数学假设检验方法及适用条件

Table 2 Common mathematic hypothesis validation methods and their application conditions of resources parameter distribution models

检验方法	优点	缺点	适用条件
K-S 检验	• 适用于小样本 • 具有分布无关性 • 稳健性好	• 对尾部数据不敏感 • 不适用于离散分布	• 目标圈闭或者类比圈闭样本较少
A-D 检验	• 适用于小样本 • 比 K-S 检验敏感	• 不具备分布的无关性 • 不适用于离散分布	• 使用 K-S 检验不敏感,且假设分布为正态分布等特定分布
χ^2 检验	• 直接利用原始数据进行检验 • 对大样本数据检验效果好 • 同时适用于连续分布、离散分布	• 不适用于小样本 • 依赖于数据分组方式	• 目标圈闭或者类比圈闭有较多样本(通常样本容量不小于 50,且 20% 的单元理论频数不能小于 5)

在上述 3 种拟合优度检验方法中,K-S 检验的综合效果最好。该方法的基本原理是将样本观测值的累计频率与假设的理论概率分布相比较,如果偏差超过一定限度,则认为假设有误^[9]。假设检验某圈闭孔隙度的 n 个样本是否符合 $N(0.5, 0.25)$ 的对数正态分布,其过程如下:首先假设该组孔隙度样本数为 n ,按观测数据由小到大排列,可得其分段累计频率如下:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & (x < x_1) \\ k/n & (x_k \leq x < x_{k+1}) \\ 1 & (x \geq x_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为排列后的孔隙度样本数据; $S_n(x)$ 为其累计频率阶梯曲线; $F_0(x)$ 为 $N(0.5, 0.25)$ 的正态分布理论分布曲线。

在此基础上,K-S 检验的步骤为:

1) 提出假设

$$H_0: S_n(x) = F_0(x), H_1: S_n(x) \neq F_0(x) \quad (2)$$

2) 计算统计量

$$D_{\max} = \max |S_n(x) - F_0(x)| \quad (3)$$

3) 查找临界值

根据给定的样本数据个数 n 和显著性水平 α , 对照 K-S 检验统计量表,可以得到临界值 D_α 。

4) 作出判定

若 $D_{\max} \geq D_\alpha$,则在 α 水平上,拒绝 H_0 ,即孔隙度样本不符合 $N(0.5, 0.25)$ 的正态分布;若 $D_{\max} < D_\alpha$,则不能拒绝 H_0 ,即孔隙度样本符合假设分布。

3.1.2 参数模型的数学检验流程

以优选出的 K-S 检验、A-D 检验、 χ^2 检验为基础,设计了圈闭资源量参数的数学检验流程(图 2)。该检验流程综合考虑了资源量参数的地学特征、参数样本的数量,以及不同假设检验方法的数学特性。

首先,在目标圈闭或者类比圈闭有较多样品的情况下(如类比区为已开发的老油田),可以考虑优先使用 χ^2 检验,发挥其在大样本拟合度测试中的优势。如

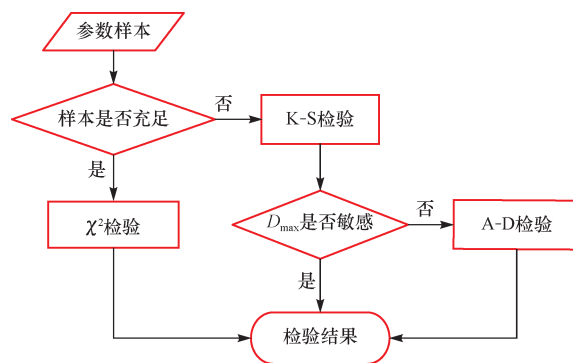


图 2 资源量参数模型的数学检验流程

Fig. 2 Mathematic check workflow of resources parameter models

果目标圈闭或者类比圈闭样品较少,则可以采用 K-S 检验,充分利用其分布无关性以及适用于小样本的特点。但由于 K-S 检验的敏感性较差,在模型优选时中经常出现两种假设 $D_{\max}$ 值相同的情况,因此如果假设分布为正态分布等特定分布,可以进一步采用敏感性更强的 A-D 检验。

3.2 地质含义检验

地质含义检验是利用圈闭资源量参数的地质含义,对参数模型的有效性进行评判的一类方法。端值检验法、类比检验法和 P_{10}/P_{90} 检验法是 3 种常用的地质含义检验手段。

3.2.1 端值检验法

在假设分布模型基础之上,利用求得的样本数字特征,可以推出计算参数的 P_1 和 P_{99} 值。该 P_1 和 P_{99} 值不应超出资源量参数理论上可能的范围。例如求得的含油气面积 P_1 值若已超出圈闭的闭合面积,则意味着应该对此假设模型进行调整。

3.2.2 类比检验法

以假设模型为基础,计算出最终的圈闭资源量分布后,将其与同一地区相似圈闭的资源量或者类似油气藏的储量类比,或者与所在地区油气田(藏)规模分布进行类比,若两者差异较大,则有必要对假设的参数模型进行检查。

3.2.3 P_{10}/P_{90} 检验法

通常用 P_{10} 与 P_{90} 的比值来反映资源量参数或结果的不确定性。 P_{10} 与 P_{90} 的比值越高,说明不确定性越大。对于有效孔隙度、含油(气)饱和度等资源量参数分布的 P_{10}/P_{90} 值一般应低于 10,否则应考虑样本是来自不同的地质相或样本数目过少。而对于资源量的 P_{10}/P_{90} 值,不确定性较小的圈闭一般在 2 到 5 之间,预探井等风险较高的目标可能会达到 25 左右。如果利用假设的参数模型得出的资源量 P_{10}/P_{90} 值过高,或者与圈闭的风险程度差距过大,则有理由怀疑所选参数概率分布的正确性。

除了利用 P_{10}/P_{90} 值,对于某些特定的分布,还可以利用其自身的数学特征来进行分位数比值的检验。例如假设样本服从对数正态分布,则其 P_{10}/P_{50} 与 P_{50}/P_{90} 的值应大致相等。

4 应用实例

利用上述方法,对位于渤海湾盆地某洼陷东北翼的 A 圈闭进行资源量参数概率分布的构建。

4.1 地质背景

该圈闭是由两条断层共同控制的断鼻构造,主要目的层为沙河街组三段中亚段(沙三中)的 5-6 砂组,整个洼陷带油源条件好,目的层之上发育稳定厚层盐岩。洼陷东、西两侧的主体构造上已发现多块含油构造,与 A 圈闭邻近的洼陷西翼断块构造已完钻探井 4 口,均在沙三中获得工业油流。目前 A 圈闭所在区域已被三维地震覆盖,并完成了构造精细解释,如图 3 所示。

4.2 资源量参数概率分布的建立

由于 A 圈闭缺乏钻井数据,因此各资源量参数概率分布的建立主要依据圈闭地震解释成果以及洼陷内勘探程度较高的可类比油藏相关数据。各参数概率分布的建立方法以类比法为主,其建立的过程如表 3 所示。

以有效孔隙度概率分布的建立过程为例,由于圈闭 A 缺乏孔隙度相关资料,其建立的依据为洼陷西翼类比圈闭的 4 口探井数据。统计样本采用 4 口探井目的层孔隙度测井解释成果等间距取样,共计 218 个,样本数字特征为均值 12.55%,方差 8.90。通过建立样本统计直方图(图 4),确定待选概率分布模型为正态分布、Beta 分布和对数正态分布。在模型的有效性检验过程中,首先数学假设检验结果显示 Beta 分布相对最符合样本数字特征(表 4);之后进行地质含义检验,端值检验结果 P_1 (17.21%) 与 P_{99} (5.36%) 值均在可信范围,同时 P_{10}/P_{90} 检验值(1.84)也较为合理,最终确定孔隙度概率分布模型采用 Beta 分布。在此基础上,采用模型参数法($\alpha = 5.20$, $\beta = 2.22$)对其进行不确定性赋值,得到最终概率分布如图 5 所示。

由表 3 建立的 A 圈闭各资源量参数最终概率分布如图 5—图 8 所示,其中,含油气面积均值为 1.36 km²,有效厚度均值为 16.85 m,有效孔隙度均值为 12.55%,含油饱和度均值为 58.85%。

4.3 资源量分布计算

以上述资源量参数概率分布为基础,采用容积法资源量计算公式,经蒙特卡洛模拟 1 000 次,得到圈闭 A 的资源量概率分布如图 9 所示,其资源量均值为 122.67 × 10⁴ t,资源量的 P_{10}/P_{90} 检验值为 7.1,处于合理范围之内。该圈闭后经钻井证实,获得工业油流,预测储量规模达到 106.52 × 10⁴ t,与本次计算的资源量概率分布结果基本符合,验证了本文所建立方法的正确性。

5 结论

1) 受地质资料和认识程度限制,圈闭资源量参数



图 3 圈闭 A 沙三中 5-6 砂组砂岩厚度与圈闭叠合图

Fig. 3 Overlay plot of trap distribution and sandstone isopach for the sand layer 5-6 of the middle 3rd Member of Shahejie Formation of Trap A

表 3 A 圈闭资源量参数概率分布模型建立过程

Table 3 Process of probability distribution modeling of Trap A resources parameters

资源量参数	概率分布建立依据	概率分布模型	赋值方式
含油面积/km ²	A 圈闭面积(地震解释); 洼陷内各圈闭含油面积系数概率分布	对数正态分布	$P_{10}=2.5, P_{90}=0.5$
有效厚度/m	A 圈闭储层预测等厚图(地震解释); 洼陷西翼邻近圈闭探井解释有效厚度	对数正态分布	$P_{10}=25, P_{90}=10$
有效孔隙度/%	洼陷西翼邻近圈闭 4 口探井解释结果	Beta 分布	$\alpha=5.20,$ $\beta=2.22,$ $Max=17.81,$ $Min=0.22$
含油饱和度/%	洼陷西翼邻近圈闭 4 口探井解释结果	正态分布	$\mu=58.5, \sigma=5.5$
原油体积系数	本地区经验值	常数	1.079
原油密度/(g·cm ⁻³)	本地区经验值	常数	0.81

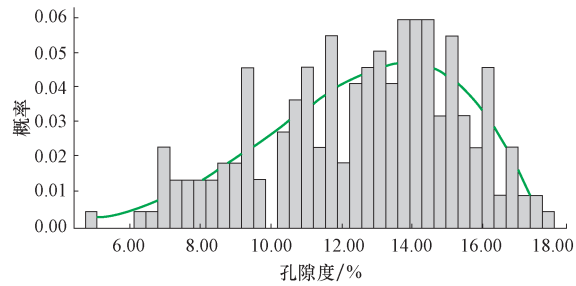


图 4 A 圈闭有效孔隙度样本概率统计直方图

Fig. 4 Probability statistics histogram of effective porosity samples of Trap A

表 4 A 圈闭有效孔隙度概率分布模型数学检验

Table 4 Mathematic checklist of probability distribution models of effective porosity of Trap A

假设检验方法	概率		
	K - S 检验	A - D 检验	χ^2 检验
Beta 分布	0.039 9	0.427 7	17.156 0
正态分布	0.083 9	1.793 5	36.972 5
对数正态分布	0.105 6	3.226 5	47.274 4

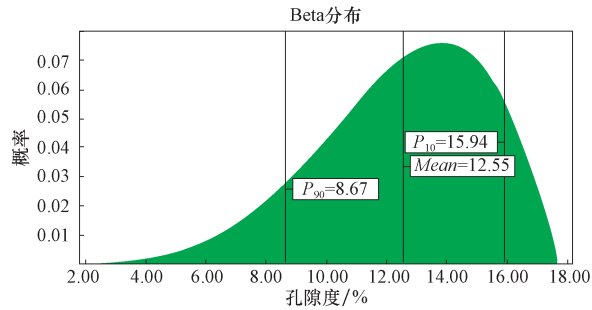


图 5 A 圈闭有效孔隙度概率分布

Fig. 5 Probability distribution of effective porosity of Trap A

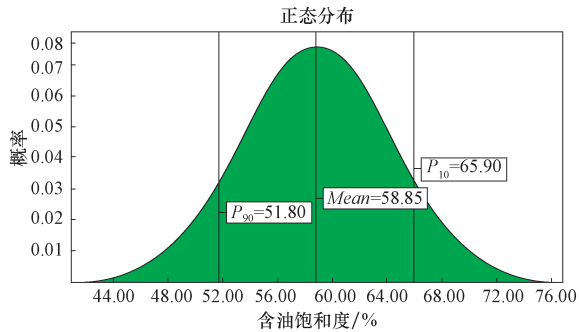


图 6 A 圈闭含油饱和度概率分布

Fig. 6 Probability distribution of oil saturation of Trap A

存在极大不确定性。概率统计法是计算圈闭资源量的有效方法,其计算结果的大小、精度与合理性受圈闭资源量参数的概率分布所决定。

2) 构建适合不同地区、不同领域圈闭的资源量参数概率分布,并进行科学的有效性检验,是准确评估圈闭资源量概率分布关键。如果草率地为圈闭资源量参

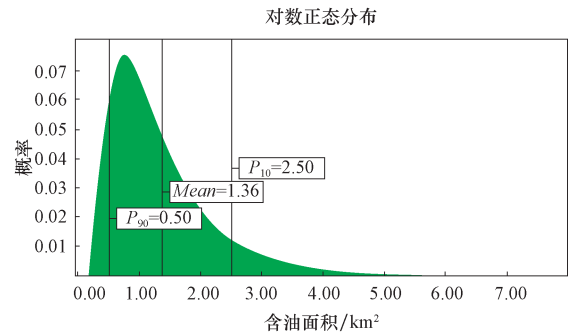


图 7 A 圈闭含油面积概率分布

Fig. 7 Probability distribution of oil-bearing area of Trap A

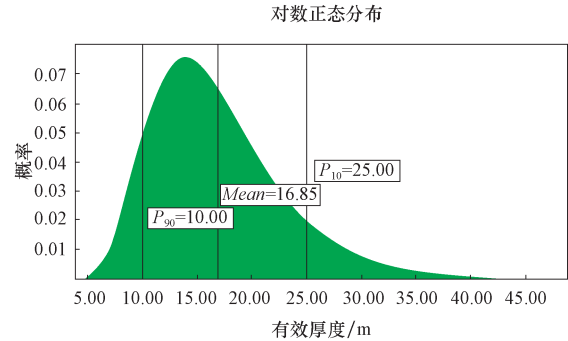


图 8 A 圈闭有效厚度概率分布

Fig. 8 Probability distribution of effective thickness of Trap A

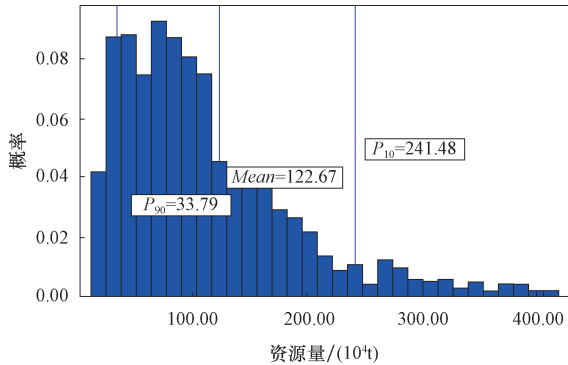


图 9 A 圈闭资源量概率分布

Fig. 9 Probability distribution of resources of Trap A

数选择概率模型并赋值,不仅无法发挥概率法的优势,更将导致圈闭资源量分布的极大误判。

3) 圈闭资源量参数模型的有效性检验是获得最优分布模型的重要途径。将 K - S 检验、A - D 检验等数学假设检验方法应用于圈闭资源量参数的构建,并根据相关参数的地学、数学特征合理地设计检验流程,可以获得更加客观、准确和量化的参数分布结论。

4) 实例研究表明,通过样本数字特征计算、分布模型的选择和不确定性赋值、概率分布的数学及地质含义检验,可以客观地量化资源量参数的不确定性,构建合理的资源量参数分布,进而科学地利用概率法计算圈闭资源量,为勘探开发决策提供可靠依据。

参 考 文 献

- [1] 李洁梅,谭学群,许华明,等. 概率法储量计算在 CLFS 项目中的应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):944-950.
Li Jiemei,Tan Xuequn,Xu Huaming,et al. Application of probabilistic method in reserve calculation for the CLFS oilfield project[J]. Oil & Gas Geology,2012,33(6):944-950.
- [2] 文环明,肖慈殉,李薇. 蒙特卡洛法在油气储量估算中的应用[J]. 成都理工学院学报,2002,29(5):487-492.
Wen Huanming,Xiao Cixun,Li Wei. Applications of the Monte-Carlo method to the petroleum reserves estimation[J]. Journal of Chengdu University of Technology,2002,29(5):487-492.
- [3] 贾成业,贾爱林,邓怀群,等. 概率法在油气储量计算中的应用[J]. 天然气工业,2009,29(11):83-85.
Jia Chengye,Jia Ailin,Deng Huaqun,et al. Application of the stochastic method to oil and gas reserves estimation[J]. Natural Gas Industry,2009,29(11):83-85.
- [4] 王艳妮,刘刚,潘源敦,等. 特尔菲与蒙特卡罗联合方法在油气资源预测评价中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2011,34(3):24-30.
Wang Yanli,Liu Gang,Pan Yuandun,et al. Application of both Delphi and Monte Carlo methods to evaluation of hydrocarbon resources[J]. Natural Gas Exploration and Development,2011,34(3):24-30.
- [5] 杨通佑,范尚炯,陈元千. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1998:218-219.
Yang Tongyou,Fan Shangjiong,Chen Yuanqian,et al. Oil and gas reserve calculation method[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1998:218-219.
- [6] 王永祥,张君峰,毕海滨,等. 油气储量评估方法(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社,2012:8-9.
Wang Yongxiang,Zhang Junfeng,Bi Haibin,et al. Determination of oil and gas reserves(2nd edition)[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2012:8-9.
- [7] 谢寅符,陈和平,马中振,等. 概率法油气储量评估及其与确定法的差异比较[J]. 石油实验地质,2014,36(1):117-122.
Xie Yinfu,Chen Heping,Ma Zhong Zhen,et al. Probabilistic estimation of reserves and difference between probabilistic and determine methods[J]. Petroleum Geology & Experiment,Petroleum Geology & Experiment,2014,36(1):117-122.
- [8] 冷济高,庞雄奇,苏栋,等. 圈闭含油气性评价研究进展[J]. 油气地质与采收率,2010,17(2):37-41.
Leng Jigao,Pang Xiongqi,Su Dong,et al. Re-search progress of evaluation on oil and gas in reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2010,17(2):37-41.
- [9] 程乐利,曹林,刘小国,等. 圈闭地质评价技术在海拉尔盆地中部南屯组的应用[J]. 广东化工,2013,40(6):19-20.
Cheng Leli,Cao Lin,Liu Xiaoguo et al. The application of trap geological evaluation techniques in the central of Hailar Basin in Nantun Group[J]. Guangdong Chemical Industry,2013,40(6):19-20.
- [10] Xie H. Prediction of petroleum exploration risk and subterranean spatial distribution of hydrocarbon accumulations [J]. Petroleum Science. 2011,8(1):17-23.
- [11] Beha A. A general method for the consistent volume assessment of complex hydrocarbon traps[J]. Journal of Petroleum Geology,2012,35(1):85-97.
- [12] 杨登维,周庆凡,郭宝申,等. 油气资源地质风险分析与管理[M]. 北京:石油工业出版社,2009:21-158.
Yang Dengwei,Zhou Qingfan,Guo Baoshen,et al. Geological risk analysis and management of petroleum resources[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2009:21-158.
- [13] Peter R,Rose. 油气勘探项目的风险分析与管理[M]. 北京:石油工业出版社,2002:6-50.
Peter R,Rose. Risk analysis and management of petroleum exploration ventures[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2002:6-50.
- [14] 胡允栋. 基于不确定性分析的油气储量分类与评估方法[D]. 中国地质大学(北京),2007:5-6.
Hu Yundong. Oil and gas reserve classification and estimation on the basis of uncertainty analysis [D]. China University of Geosciences (Beijing),2007:5-6.
- [15] 米立军,张厚和,陈蓉. 中海油勘探投资组合管理理念与实践[J]. 中国石油勘探,2011,16(1):70-74.
Mi Lijun,Zhang Houhe,Chen Rong. Management idea and practice of exploration portfolio of CNOOC [J]. China Petroleum Exploration,2011,16(1):70-74.
- [16] 高林. 油气勘探风险评价[J]. 勘探地球物理进展,2003,26(5-6):402-406.
Gao Lin. Risk assessment in oil and gas exploration[J]. Progress in Exploration Geophysics,2003,26(5-6):402-406.
- [17] 徐振邦,姜元仁. 数学地质基础[M]. 北京:北京大学出版社,1994:27-28.
Xu Zhenbang,Lou Yuanren. Fundamental of mathematical geology [M]. Beijing:Peking University Press,1994:27-28.
- [18] 阳正熙,吴玺虹,彭直兴. 地学数据分析教程[M]. 北京:科学出版社,2008:24-25.
Yang Zhengxi,Wu Qianhong,Peng Zhixing. Geoscience data analysis tutorial[M]. Beijing:Science Press,2008:24-25.
- [19] 杨振海. 拟合优度检验[M]. 北京:科学出版社,2011:1-36.
Yang Zhenhai. Goodness of fit test [M]. Beijing: Science Press,2011:1-36.
- [20] 黄克中,毛善培. 随机方法与模糊数学应用[M]. 上海:同济大学出版社,1987:130-134.
Huang Kezhong,Mao Shanpei. Stochastic methods and fuzzy mathematics[M]. Shanghai:Tongji University Press,1987:130-134.

(编辑 张亚雄)