

文章编号:0253-9985(2012)06-0944-07

概率法储量计算在 CLFS 项目中的应用

李洁梅¹, 谭学群¹, 许华明¹, 张 鹏²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 山东省第五地质矿产勘察院, 山东 泰安 271021)

摘要:采用蒙特卡洛模型进行储量计算, 承认储量参数具有不确定性。鉴于各地质参数本身的随机性特点, 将其视为以不同概率在实数域上随机取值的随机变量, 较好地掌握参数的取值范围。同时, 结合 CLFS 项目储量计算实例, 按照 SPE 标准, 详细分析了具有较大不确定性参数的取值方法, 包括含油面积、孔隙度、有效厚度、饱和度和原油体积系数等多个储量参数。确定了各个参数的取值范围, 求出了各个参数的 P10、P50 和 P90 值。最终的储量结果是一个储量范围, 涵盖了从保守到乐观的估值范围, 从而更准确地把握了油田储量状况, 为油田的勘探开发决策提供了更可靠的依据, 降低了油气勘探开发过程中决策的风险。

关键词: 概率分布函数; 确定法; 概率法; CLFS 项目; 储量计算

中图分类号: TE155

文献标识码: A

Application of probabilistic method in reserve calculation for the CLFS oilfield project

Li Jiemei¹, Tan Xuequn¹, Xu Huaming¹ and Zhang Peng²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2 The Fifth Geological Prospecting Institute, Tai'an, Shandong 271021, China)

Abstract: The Monte Carlo simulation was applied to reserve calculations to honor the uncertainties of reserve parameters. As geologic parameters themselves are random in nature, they are treated as stochastic variables that randomly choose values in real number domain with different probabilities. Taking reserve calculation of the CLFS project as an example, suitable valuing methods were selected for parameters with uncertainties in accordance with the SPE standards. These parameters include oil-bearing areas, porosity, effective thickness, saturation and crude volume coefficient. The value ranges of each parameter were determined and their values at P10, P50 and P90 were calculated. The final calculation result is just a range of reserves, covering the full value ranges from conservative to optimistic. By doing so, we could master the overall situation concerning the reserve of the oilfield so as to provide more reliable bases for exploration and development strategies and reduce decision-making risks.

Key words: probability distribution function, deterministic method, probabilistic method, CLFS project, reserve calculation

油气田勘探和开发的一项重要任务就是落实油气资源的探明程度, 预估油气储量的大小。容积法是计算油气地质储量的主要方法, 它采用油气藏静态资料对储量进行评估, 因此适用性较好, 适用于不同勘探开发阶段、不同的圈闭类型、不同的储集类型和驱动方式。

从计算参数取值的角度来看, 容积法储量计

算包括确定法和概率法。确定法中各计算参数取值为各参数的加权平均值, 对于已开发成熟地区, 钻井较完善, 资料相对较丰富, 模型的建立比较落实, 用确定法估算的储量结果是可以接受的。但是对于勘探新区、新领域、复杂地质条件等情况, 用于研究地下油、气藏的资料不完备, 难于精确的确定油、气藏的储量计算值, 也就是说, 虽然给定

收稿日期: 2011-10-14; 修订日期: 2012-09-16。

第一作者简介: 李洁梅 (1982—), 女, 硕士、工程师, 油气田开发地质。

基金项目: 中国石化国勘横向项目 (E60-00552)。

了确定的储量参数,但是实际上存在较大不确定性(随机性),相应地,储量结果也就具有不确定性或随机性,从而不能正确评价油气勘探开发中的风险。概率法采用蒙特卡洛模型进行储量计算,承认储量参数具有不确定性,并且鉴于各地质参数本身的随机性特点,将其视为以不同概率在实数域上随机取值的随机变量或随机参数模型。概率法储量结果是一个储量范围,涵盖了从保守到乐观的估值范围,从而更准确地把握了油田储量状况,为油田的勘探开发决策提供了更可靠的依据,降低了油气勘探开发过程中决策的风险。

1 问题的提出

CLFS 项目要求按照 SPE 标准复算储量,给出 1P(或 1C)、2P(或 2C)和 3P(或 3C)值(图 1)。SPE 标准规定,资源评估可采用确定法或概率法,或者为保证预测结果的合理性,可结合使用确定法和概率法。

在概率法中,研究人员针对输入的参数,首先给出一个概率分布类型,并求出该参数的分布范围,然后使用容积法计算地质储量,得到的储量是一个区间。这种方法通常在勘探至开发早期阶段使用^[1]。

CLFS 项目整体处于未开发阶段,很多含油构造上往往只有一口井控制,储量计算参数若取单一值会有较大的不确定性。因此,在 CLFS 项目的储量计算中采用概率法更为合理。

对于每种储量计算参数,根据其特点选取合适的概率分布类型,再采用蒙特卡洛模拟确定三级估值。三级估值是指参数的可靠程度,即该参数 P90(低估值或保守值)、P50(最佳值)和 P10(高估值或乐观值),可对应求取 1P(或 1C)、2P(或 2C)和 3P(或 3C)储量。

证实储量: 至少90%可能性(P90)	P1(或C1)
概算储量: 至少50%可能性(P50)	P2(或C2)
可能储量: 至少10%可能性(P10)	P3(或C3)
1P=P1	或 1C=C1
2P=P1+P2	或 2C=C1+C2
3P=P1+P2+P3	或 3C=C1+C2+C3

图 1 SPE 储量分类

Fig. 1 SPE reserve classification

2 概率储量计算方法

概率法的基本方法主要是应用蒙特卡洛模拟法进行储量计算。蒙特卡洛模拟是一种概率统计方法,应用随机技术进行模拟计算的方法的统称,通常被用来模拟服从某种分布的随机变量,并实现随机变量之间的运算,最终结果是以随机变量分布函数的形式给出。这种分布函数不仅代表了全部可能的结果,而且指出了各种结果出现的可能性,即概率。

在蒙特卡洛储量模拟计算中,参与油气储量计算的各个地质参数被看成是服从某种分布的随机变量(图 2),图中横坐标为储量随机参数,纵坐标为累积(P)概率。从图中可以看出:储量计算公式中的各地质参数不是一个确定的值,而是随机变量的分布函数,储量即是随机变量分布函数之间的乘积,因此,储量也是随机变量的分布函数,相应的计算石油地质储量公式为:

$$N = Ah\Phi(1 - S_{wi})/B_{oi} \quad (1)$$

式中: N 为原油的地质储量, m^3 ; A 为含油面积, km^2 ; h 为有效厚度, m ; Φ 为有效孔隙度,小数; S_{wi} 为含水饱和度,小数; B_{oi} 为地层原油体积系数, m^3/m^3 。

基于随机参数的概率法计算储量分为 3 个步骤:①利用统计法构建各个参数的分布函数;②对随机变量分布函数进行随机取值并计算储量;③计算储量并构建储量的随机分布函数^[2-5]。

采用容积法计算原油地质储量,需要确定 5 个储量计算参数,即含油面积、有效厚度、原油体积系数、有效孔隙度和含油饱和度(S_o)。对于

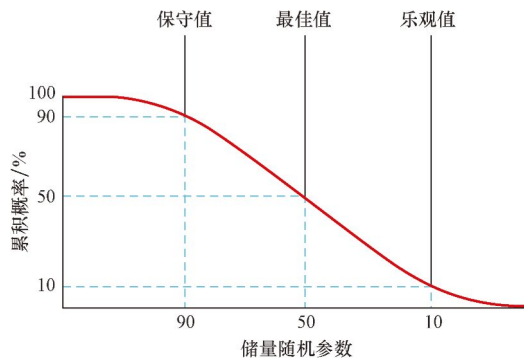


图 2 概率法参数示意图

Fig. 2 Sketch map showing the parameters of probabilistic method

CLFS项目,前3个参数由于井少(一个断块上往往就一口井)、数据量有限,可采用三角概率分布,首先确定一个基本值,然后根据其可靠程度确定变化范围;后2个参数由于是通过测井解释得到,数据点多,可采用连续型正态分布。

2.1 含油面积的确定

根据构造、储层、油(气)水界面、断层、地层与岩性边界、油(气)藏类型等,确定含油(气)面积的变化范围。

对于受构造因素控制的含油边界,钻遇油水界面的油藏,取经过海拔校正的油水边界圈定含油面积;对于钻遇油底的油藏取经过海拔校正的油层底界圈定含油面积;对于受岩性因素控制的含油边界,在岩性尖灭区按岩性尖灭边界作为有效厚度0线圈定含油面积;对于断层遮挡因素控制的含油边界,在断层边界的地方按断层线确定含油边界^[6-7]。

含油面积采用三角分布,并根据风险程度给定取值范围。不同含油构造的取值标准为表1。含油面积和构造的落实程度与油水界面的确定方法关系密切。

A类:构造落实,钻遇油水界面或通过油水界

面通过MDT等可靠的测试资料得到,油水界面清楚。确定含油面积的变化范围为-5%~5%;

B类:构造落实,未钻遇油水界面,油水界面是通过最低可见油底推断的,或推断有效厚度0线,确定含油面积的变化范围为-10%~10%;

C类:构造不十分落实,推断油水界面或推断有效厚度0线,确定含油面积的变化范围为-20%~20%。

2.2 其他参数的确定

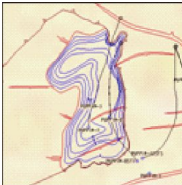
有效厚度、原油体积系数,采用三角概率分布,首先确定一个基本值,然后根据其可靠程度确定变化范围。有效厚度数据有限,给定变化范围-20%~20%。原油体积系数一般变化不大,储量计算中可将其变化范围设定为-5%~5%。

有效孔隙度和含油饱和度是通过测井解释得到,数据点多,可采用连续型正态分布。

对选择三角分布的参数变化范围的合理性进行了讨论。通常,复算结果与上次相差20%就要分析原因,说明20%是一个关键点。由此可以借鉴,不确定性较大的参数变化范围定为-20%~20%,中等的参数变化范围定为-10%~10%,比较确定的参数变化范围定为-5%~5%。

表1 不同含油构造的取值标准

Table 1 Value-choosing standards for different oil-bearing structures

分类	标准	构造形态	取值范围/%	储量单元
A类	构造落实,MDT测试,油水界面清楚	 Ta井区	-5~5	Pu-1 Pu-2 Pu-9 Gr-1 Ta-1/2
B类	构造落实,推断油水界面,推断有效厚度0线	 Pu-5井区	-10~10	Pu-5 Pu-11(好油层)
C类	构造不十分落实,推断油水界面或推断有效厚度0线	 Pu-11井区差油层	-20~20	Pu-11(差油层)

2.3 适用范围

概率法适用于油田从勘探阶段向开发阶段转型的时期,在国内的石油储量计算中到目前为止使用的比较少,没有太多可以借鉴的经验。文中通过对 CLFS 项目的研究,把概率法具体的应用到资料极端缺乏地区的储量计算中,具有很好的指导意义。首先,相对于确定法,概率法可对不同储量值的风险进行量化,提供对应于不同累积概率的地质储量估值,为开发投资提供更加充分的决策参考依据。其次,每一个参数的计算都充分考虑了该地区的具体条件,在资料不足的情况下,灵活选择参数分布函数,确定合理的取值范围,较好地保证了研究结果的可靠程度。

3 实际应用

储量计算单元主要是根据平面上以独立的油、气藏,纵向上按含油气层系作为独立的计算单元划分。CLFS 项目共划分了 10 个储量计算单元。文中选取 Pu-5 单元为例说明概率法在 CLFS 项目储量计算中的具体应用。

Pu-5 单元属于 Pu-NE 油藏的一个计算单元。Pu-NE 构造位于 AC/L6 区块 Pu 地垒东北部的构造上,是夹持在北部东西走向北倾的断层和南部近东-南西走向南东倾断层之间,由多个高点组成的背斜圈闭(图 3),圈闭面积 1.2 km^2 。构造轴向走向近南北向,Pu-NE 构造内有几个局部小构造,高点埋深约为 $2\ 020 \text{ m}$ 。

Pu-NE 油藏为常温、常压系统。油藏温度 86°C (垂深 TVD $2\ 053 \text{ m}$),温度梯度为每百米 3.5°C ;油藏压力 20.73 MPa (垂深 TVD $2\ 053 \text{ m}$),压力系数 $1.03 \sim 1.06$ 。

Pu-NE 油藏平面上为一个含油层系,纵向上有两套地层 K-6 和 K-7,均为含油层系,其中含油层系 K-6 就是 Pu-5 计算单元,埋深 $2\ 000 \sim 2\ 350 \text{ m}$ 。砂岩为大套块状厚层砂岩,在工区内发育厚度为 $50 \sim 110 \text{ m}$ 左右。

Pu-5 为背斜构造油藏,储层物性好,但平面纵向变化较大,岩心分析测得孔隙度油水界面为 $-2\ 034 \text{ m}$ (水下真实垂直深度 TVDss),油层含油性好,为油田主力储层。油藏与底水连通性好,属大底水且地层能量充足的薄油藏。

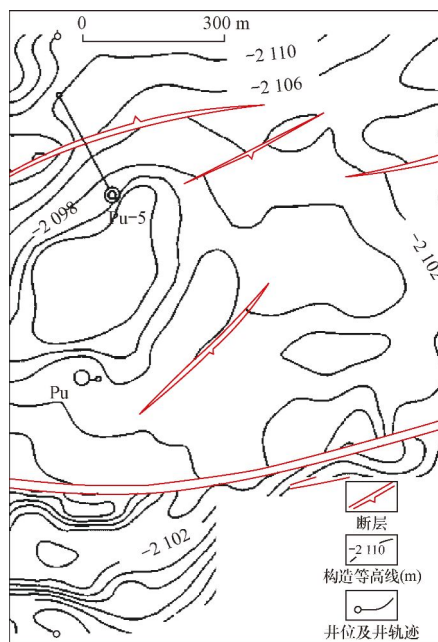


图3 Pu-NE 区 Pu-5 含油构造

Fig. 3 Pu-5 oil-bearing structure in the Pu-NE block

3.1 地质储量参数的计算

在概率方法中,首先对参数的原始数据进行统计分析,确定其概率分布函数。对于每一储量计算参数,需采用蒙特卡洛概率法计算三级估值。因此在地质储量计算参数确定过程中,首先依据构造解释成果、测井解释结论得到一个确定值,然后根据不同参数可靠程度或者数据分布特征确定该参数 P90(低估值)、P50(最佳值)和 P10(高估值)值,可对应求取 1P(1C)、2P(2C)或者 3P(3C)储量。

3.1.1 含油面积的确定

Pu-NE 油田 K-6 层:该单元为多种因素共同控制的油藏,南部断层控制,北部构造控制,东部岩性控制,故此单元的概率分布可归为 B 类。区内有 3 口井,Pu-5 井、Pu-7 和 Pu-8ST1 井。其中 Pu-7 和 Pu-8ST1 井为水平井,只有 Pu-5 井为直井,解释有效厚度 1 层,为 8.7 m 。根据压力测试梯度曲线,Pu 油田北东块 K-6 有统一的油水界面,深度为 TVDss $-2\ 034 \text{ m}$,以 TVDss $-2\ 034 \text{ m}$ 线作为油水边界,东部及南部分别按岩性及断层的圈定原则圈定含油边界。圈定的含油面积为 1.22 km^2 (图 4)。根据含油面积的取值标准(表 1),可以计算得出其 P90、P50 和 P10 值分别为 1.15 、 1.22 和 1.29 km^2 (图 5)。

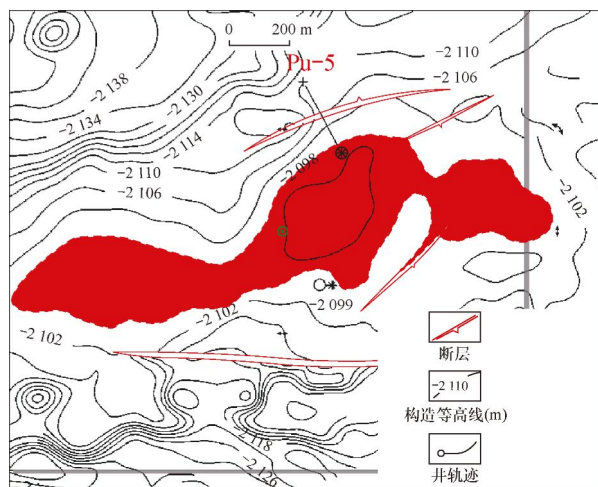


图4 Pu-NE区Pu-5单元含油面积

Fig. 4 Pu-5 oil-bearing area in the Pu-NE block

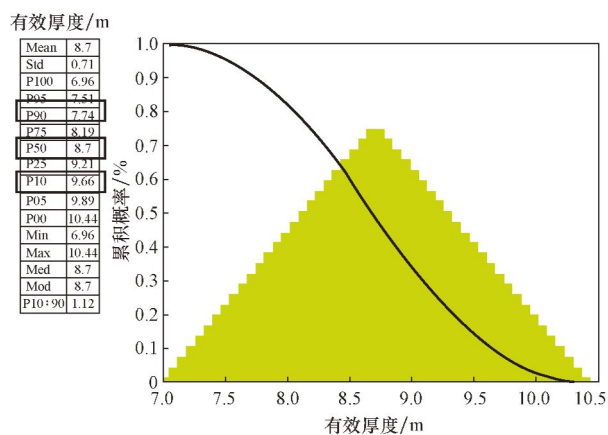


图6 Pu-5单元有效厚度概率分布

Fig. 6 Probability distribution of the effective thickness of the Pu-5 unit

(有效厚度服从三角分布。)

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max. 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数; P10 : P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

3.1.2 有效厚度的确定

对于变化不大或者井控数据偏少的参数, 如含油面积、有效厚度、原油体积系数, 采用三角分布, 并根据风险程度给定取值范围。

依据测井解释成果确定单井有效厚度, 因测井数据有限, 通常一个含油构造仅 1~2 口井, 无法采用统计方法得到有效厚度的取值范围, 故设定变化范围 -20%~20%, 从而得到三级估值(图6)^[8-11]。

3.1.3 有效孔隙度的确定

对测井解释中油层的有效孔隙度数据进行统

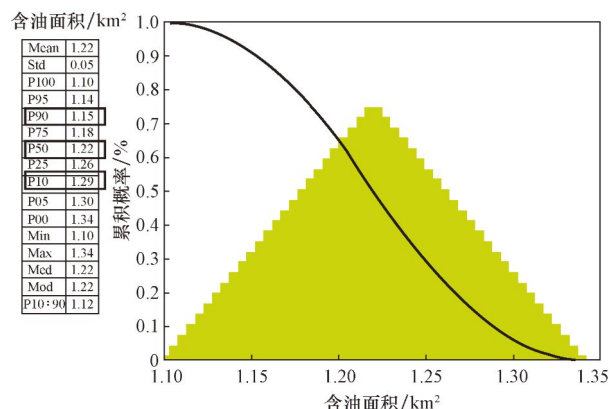


图5 Pu-NE区Pu-5单元含油面积概率分布

Fig. 5 Probability distribution of the Pu-5 oil-bearing area in Pu-NE block

[含油面积服从三角分布。]

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max. 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数; P10 : P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

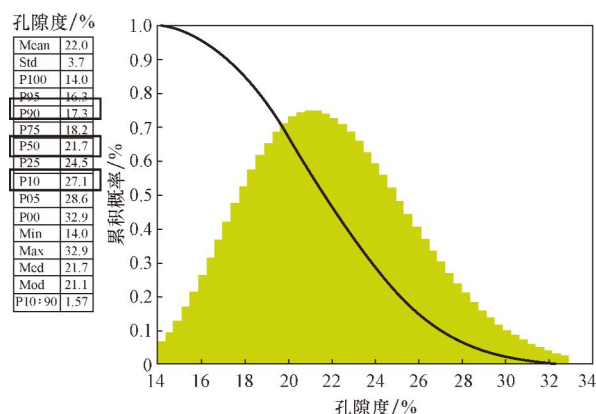


图7 Pu-5单元孔隙度概率分布

Fig. 7 Probability distribution of porosity of the Pu-5 unit

(孔隙度服从三角分布。)

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max. 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数; P10 : P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

计分析, 确定其概率分布特征(图7), 可以看出孔隙度为正态分布, 显示为有偏度, 正偏可用对数正态分布。然后选用对数正态分布函数来计算含油构造单元的有效孔隙度分布范围, 从而确定该含油构造有效孔隙度的三级估值。

3.1.4 含油饱和度的确定

对测井解释中油层的含油饱和度数据进行统计分析, 确定其概率分布特征(图8), 可以看出原始含油饱和度表现为负偏, 因此可以选用正态 β 分布

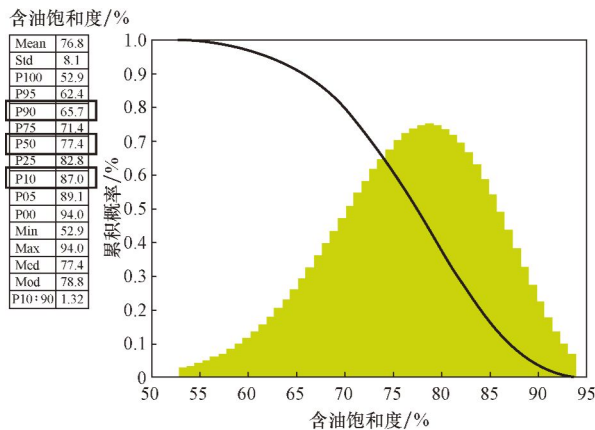


图8 Pu-5单元含油饱和度概率分布

Fig. 8 Probability distribution of the oil saturation in the Pu-5 unit
(含油饱和度服从 β 分布。)

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数;
P10: P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

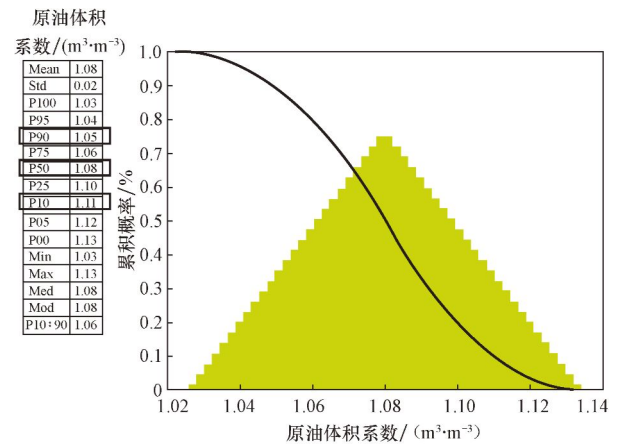


图9 Pu-5单元原油体积系数概率分布

Fig. 9 Probability distribution of volume coefficient in the Pu-5 unit
(原油体积系数服从三角分布。)

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数; P10: P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

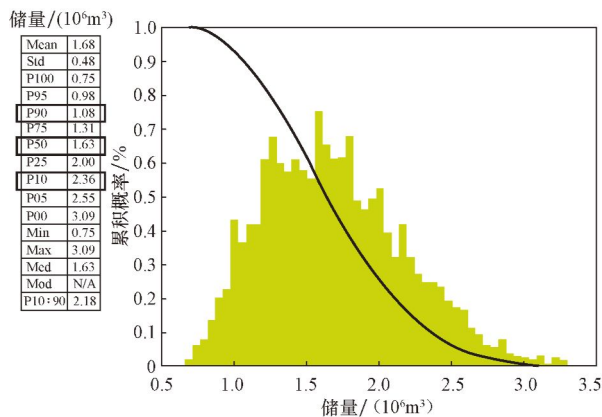


图10 Pu-5单元储量概率分布

Fig. 10 Probability distribution of reserve in the Pu-5 unit

Mean. 平均值; Std. 标准偏差; P50. 累积概率为 50%; Min. 最小值; Max 最大值; Med. 中间值; Mod. 众数, 即出现频率最高的数; P10: P90. 累积概率 10% 的值除以累积概率 90% 的值

来计算不同含油构造单元的含油饱和度分布范围, 从而确定该含油构造的含油饱和度的三级估值。

3.1.5 原油体积系数

对于变化不大或者井控数据偏少的参数, 如含油面积、有效厚度、原油体积系数, 采用三角分布, 并根据风险程度给定取值范围。

根据 Pu-5 井高压物性资料, 确定 Pu-5 单元的原油体积系数为 1.08。原油体积系数一般变化不大, 储量计算中可将其变化范围设定为 -5% ~ 5%, 从而得到三级估值(图9)。

3.2 储量计算结果

将确定的上述各项参数输入蒙特卡洛模型中进行计算, 即可得到 Pu-5 单元的储量分布函数(图10)。从计算结果可以看出, 概率法给出了不同计算参数以及储量结果的三级估值, 为决策人员提供了一组从保守到乐观的储量估值范围, 从而更准确地把握了油田储量状况, 更科学地提供勘探开发依据(表2)。

表2 Pu-5单元储量计算参数

Table 2 Parameters for reserve calculation of the Pu-5 unit

参数	面积/km ²	原油体积系数/(m ³ ·m ⁻³)	有效厚度/m	有效孔隙度/%	含油饱和度/%	原油储量/t
低估值	1.15	1.05	7.74	17.3	65.7	950 600
最佳值	1.22	1.08	8.70	21.7	77.4	1 435 000
高估值	1.29	1.11	9.66	27.1	87.0	2 077 600

4 结论

1) 针对储量计算的各项参数,分析其概率分布特点,确定不同的计算方法。按照 SPE 标准进行储量计算,采用蒙特卡洛概率法,在 Geoknowledge 公司的 GeoX 软件(版本 5.7)程序上完成 CLFS 项目的储量复算。

2) 概率法计算储量得出 $P_u - 5$ 单元的 P_{50} , P_{10} , P_{90} 值,相比较之前用容积法计算得出的储量结果,概率法可对不同储量值的风险进行量化,提供对应于不同累计概率的地质储量值,为开发投资提供充分的决策参考依据^[12-15]。

3) 概率法在 CLFS 项目的应用过程中,有 3 个参数的分布类型选用了三角分布,首先确定一个基本值,然后根据其可靠程度确定变化范围。在此过程中,我们是把基本值当做中值来进行计算的,在实际情况中基本值并不一定是中值,这是一个有待解决的局限性,值得进一步的探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] 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 Huaiqun, et al. Application of the stochastic method to oil and gas reserves estimation[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 83-85.
- [2] 杨通佑. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1990:83-85.
Yang Tongyou. Reserves calculation method of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 83-85.
- [3] 金强,王伟峰,信荃麟. 测井多井储层评价与石油储量计算[J]. 石油实验地质,1994,16(2):152-156.
Jin Qiang, Wang Weifeng, Xin Quianlin. Reservoir evaluation and petroleum reserve estimation by multiple well-loggings[J]. Petroleum Geology & Experimental, 1994, 16(2): 152-156.
- [4] 贾承造. 美国 SEC 油气储量评估方法[M]. 北京:石油工业出版社,2004:54-83.
Jia Chengzao. American reserves evaluation methods of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 54-83.
- [5] 刘吉余. 油气田开发地质基础[M]. 北京:石油工业出版社,2006:372-373.
Liu Yujie. Oil and gas field development geological foundation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 372-373.
- [6] 吴元燕,吴胜和,蔡正旗. 油矿地质学(第三版)[M]. 北京:石油工业出版社,2005:296-315.
Wu Yuanyan, Wu Shenghe, Cai Zhengqi. Oilfield geology(3rd edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 372-373.
- [7] 刘吉余,隋新光,于润涛. 地质储量精细计算方法研究[J]. 海洋地质动态,2003,19(9):31-34.
Liu Jiyu, Sui Xinguang, Yu Runtao. Method of fine calculation of geologic reserves[J]. Marine Geology Letters, 2003, 19(9): 31-34.
- [8] 赵文智,毕海滨. 浅析中国与西方在储量计算中确定有效厚度之差异[J]. 石油勘探与开发,2005,32(3):125-129.
Zhao Wenzhi, Bi Haibin. Differences of net pay estimation between China and SEC[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 125-129.
- [9] 吴国干,胡允栋,王永祥,等. 油气储量评估与油气藏圈闭成因的主控因素[J]. 石油学报,2008,29(6):804-808.
Wu Guogan, Hu Yundong, Wang Yongxiang, et al. Main control factors for estimation of oil and gas reserves and genesis of traps in oil and gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 804-808.
- [10] 全国国土资源标准化技术委员会. GB/T 19492—2004 石油天然气资源/储量分类[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
National Technical Committee on Land and Resources of Standardization Administration of China. GB/T 19492—2004 Classification for petroleum resources/reserves[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [11] 李会军,鄢犀利,郭娟,等. 柴达木盆地源自石炭系油气显示特征及其意义[J]. 断块油气田,2011,18(1):14-17.
Li Huijun, Yan Xili, Guo Juan, et al. Characteristics and significance of hydrocarbon shows originated from Carboniferous formation in Qaidam Basin[J]. 2011, 18(1): 14-17.
- [12] 胡允栋,萧德铭,王永祥. 按 SEC 标准进行油气证实储量评估的基本原则[J]. 石油学报,2004,25(2):19-24.
Hu Yundong, Xiao Deming, Wang Yongxiang. The principles for estimation proven reserves following SEC standards[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 19-24.
- [13] SPE, WPC, AAPG, SPEE. Petroleum resources management system[EB/OL]. [2008-01-07]. [http://www.spe.org/spesite/spe/spe/industry/reserves/Petroleum Resources Management System 2007. pdf](http://www.spe.org/spesite/spe/spe/industry/reserves/Petroleum%20Resources%20Management%20System%202007.pdf).
- [14] 范昌育,王震亮,李萍. 新构造运动对东濮凹陷北部古近系烃源岩生烃的影响及其对浅层油气成藏的意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):386-392.
Fan Changyu, Wang Zhenliang, Li Ping. Influence of Neotectonics on hydrocarbon generation in the Paleogene source rocks of the northern Dongpu Depression and its implications for the forming of oil/gas pools in shallow strata[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 386-392.
- [15] 焦翠华,夏冬冬,王军,等. 特低渗砂岩储层物性下限确定方法——以永进油田西山窑组储集层为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):379-383.
Jiao Cuihua, Xia Dongdong, Wang Jun, et al. Methods for determining the petrophysical property cutoffs of extra-low porosity and permeability sandstone reservoirs—an example from the Xishanyao Formation reservoirs in Yongjin oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 379-383.

(编辑 高岩)