

石油资源量估算与蒙特卡洛 分析方法的应用

林俊雄

(地质部石油地质中心实验室)

目前,国外在石油和天然气资源量的估算中,蒙特卡洛法得到了普遍的运用。加拿大已成功地应用这一方法对其本国的油气资源进行了估算,得出了全国各大油气区的资源量概率分布曲线。美国还建立了专门估算油气的数据系统。

本文以一些实例,简要地论述这个方法的某些概念及其实现方法;同时对资源量估算中的参数概型的选择作一些比较。

一、概念和公式的简述

蒙特卡洛法实质上是随机现象的一种数学模拟。以往对油气资源量的估算方法,仅是平均概念下估算的一个值。事实上,它却包含着各种复杂的随机因素。因此,概率统计可以把石油资源量 Q 当作是各种随机变量参数(或因素)的随机函数。在这个前提下,就可运用蒙特卡洛法得出 Q 存在的数值范围及其把握程度,即得出资源量 Q 的概率分布曲线。

应用蒙特卡洛法,多数采用体积法公式和相应的参数,但在不同地区和不同地质条件下,选取什么公式和相应的参数更为合理,则必须由有经验的地质人员确定。本文以体积法公式介绍蒙特卡洛法的具体运用,其公式如下:

$$Q = HSR(1 - S_w)D/F \quad (1)$$

Q : 石油资源量(万吨)

H : 含油层厚度(米)

S : 地质体的含油面积(平方公里)

R : 孔隙度(%)

S_w : 含水饱和度(%)

D : 原油比重(吨/立方米)

F : 原油体积系数

上述公式的参数均可认为是互相独立的随机变量, Q 为以上随机变量的函数。当已知这些参数各自的概率分布时,就能对它们进行随机抽样。例如各参数的第一次抽样值分别为 H_1 、 S_1 、 R_1 、 $1 - S_{w1}$ 、 D_1 和 F_1 ,那么其乘积

$Q_1 = H_1 S_1 R_1 (1 - S_{w1}) D_1 / F_1$ 就是随机函数, 即资源量 Q 的一个解。可以把这个乘积称为蒙特卡洛乘。当重复 N 次抽样, 就得到 Q 的 N 个解。这就是随机函数 Q 的一个容量为 N 的样本, 然后对 N 的样本进行统计处理, 就可得到资源量 Q 的分布。一般这种抽样要进行几千次乃至上万次的运算, 所以这一方法必须使用电子计算机才能实现。

估算一个盆地的石油资源量时, 可根据普查勘探的不同程度, 把盆地作为一个整体进行估算, 也可以由多个勘探层或构造圈闭组成的多单元体进行估算。在后一种情况下, 必须先求出各个单元体的资源量分布曲线。例如把一个盆地分成 K 个独立的单元体, 就有 K 个单元体的资源量分布曲线, 记为 $P_1 = P_1(Q_1)$, $P_2 = P_2(Q_2)$, $\dots \dots P_K = P_K(Q_K)$, 然后按蒙特卡洛分析法分别对 K 个资源量分布进行第一次随机抽样, 记为 $Q_{11}, Q_{21}, \dots \dots Q_{K1}$, 它们的和 $Q_1 = Q_{11} + Q_{21} + \dots \dots + Q_{K1}$, 就是全盆地资源量 Q 的一个解。这个和可称为蒙特卡洛加。重复 M 次抽样, 就得到 M 个蒙特卡洛加, 即得到 Q 的一个容量为 M 的样本。由此, 即可求出全盆地的石油资源量的概率分布。

应用蒙特卡洛加不仅便于对不同地质体单元进行更为灵活和细致的估算, 而且也便于最后求出各个大油气区乃至全国油气资源量的概率分布。

必须指出, 对上述的概率分布, 一般为了使用方便, 可采用累计分布的形式, 即将随机变量参数如含油层厚度 H 等以及随机变量函数 Q , 在计算机上模拟计算得出的概率分布曲线, 按步长从最大值逐步累计到最小值, 成为累计概率曲线。实际上, 不论采用哪一种形式, 其本质都是一致的。

二、蒙特卡洛模拟的实现方法

按表1, 在不同的电子计算机上, 应用各种算法语言编制成程序。实现其程序的关键部分是得到的 $(0, 1)$ 区间均匀分布随机数 r_n (伪随机数) 须具有较好的随机性。有些算法语言配有伪随机函数, 这样使用起来较为方便。若用程序方法来得到均匀分布随机数, 一般采用乘同余法。它的迭代计算公式是:

$$X_i \equiv \lambda X_{i-1} \pmod{M}, \quad r_i = X_i M^{-1}$$

模 M 和控制参数 λ 、 X_i 是选定的常数

用此迭代法就可得到 $(0, 1)$ 区间的均匀分布随机数 r_n 。上式的参数 M 、 λ 和 X_i 的确定与具体使用的计算机字长有关。对于产生的随机数, 在投入正式使用前必须进行统计假设检验, 检验其是否具有所要求的随机性, 以保证蒙特卡洛计算结果没有太大的系统误差。这个检验一般可以包括分布的均匀性、数值出现的独立性等〔1〕。

有了 $(0, 1)$ 区间均匀分布随机数, 通过适当的变换, 就可得到任意分布的随机数。任意区间 (a, b) 的均匀分布变换公式是:

$$X\xi = a + \xi / (b - a)$$

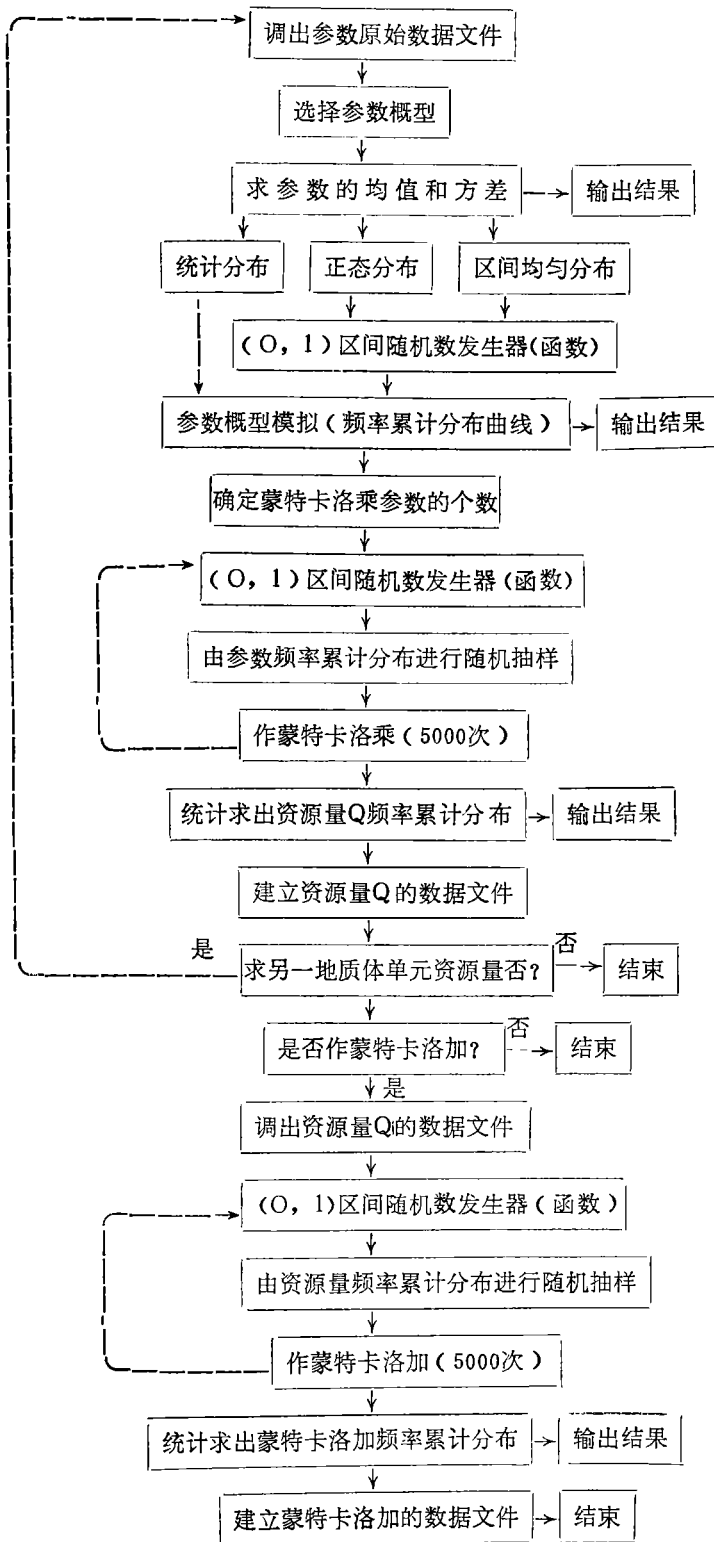
ξ 是 $(0, 1)$ 区间的均匀分布随机数

正态分布随机数是通过如下方法获得的:

首先假定 $\xi_1, \xi_2, \dots \dots \xi_n$ 为 $(-1, 1)$ 区间的 n 个独立随机变量, 则它们的期望 $m_i = 0$, 方差 $\sigma_i = 1/3$ 。根据中心极限定理, 这些随机变量的和 $\xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots \dots + \xi_n$, 随着 n 的增

蒙特卡洛方法估算石油资源量的计算程序表

表 1



石油研究所

加接近正态分布，且它的期望为0，一方差为n/3。由此，借助均匀分布随机数的和 ξ ，不难验证下述变换公式 $X = m + \sqrt{\frac{3}{n}}\sigma \xi$ 满足正态随机分布。例如取 $n=12$ ，同时把 $(-1, 1)$ 区间的均匀分布随机变量 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ，应用上述 $(0, 1)$ 区间均匀分布变换公式代入并求和，则得：

$$X = m + \frac{\sigma}{2} \sum_{i=1}^{12} (2r_i - 1)$$

其中 m 和 σ 为所模拟参数的均值和方差， X 为所模拟参数的正态分布随机数〔3〕。

按表1，在计算石油资源量 Q 之前，首先要求确定所计算的地质体的类型是盆地、勘探层、构造或其它圈闭，然后根据钻井、测井资料以及实验分析数据等来确定并统计公式(1)中各有关参数的原始数据，最后确定这些参数是常数或随机变量。当确定是随机变量时，可根据经验或普遍的规律选定该参数的概型。一般说来，含油层厚度 H 、孔隙度 R 、含油饱和度 $(1 - S_w)$ 以及含油面积 S 的概率分布可取正态概型。若统计的参数的原始数据比较充分，也可以用实际统计出来的结果作为该参数的概型。对于某些地质体，有时并不能统计出合适的含油层厚度 H 和含油面积 S ，但往往可得到它的可能的最小和最大体积，在这种情况下，可假定该地质体的体积 V 的分布为其最小值至最大值的均匀分布。C·波珀在分析东委内瑞拉盆地马塔-阿西玛油田的资源量时，就采用这个方法〔2〕。本文估算广东三水盆地某油田的三水农场断块的资源量时，作为一种概型的应用，采用此法作了尝试。

在参数选择和原始数据整理完毕之后，就可将原始数据组织成数据文件存入计算机，便于资料的修改、更新、补充以及对结果进行复算或重新估算。

三、实例的讨论

为了检验应用蒙特卡洛方法编制的程序，选择了几个油田实例进行讨论。

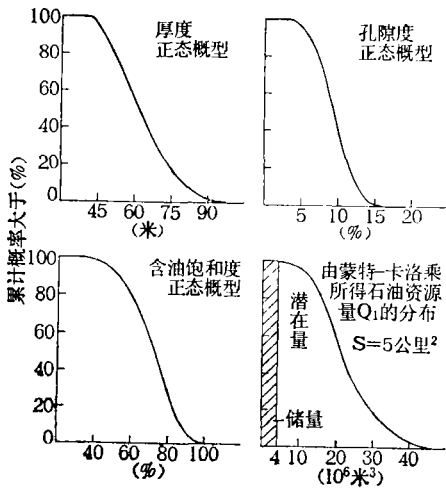


图 1 某油田长-8油层组参数的正态概型模拟及石油资源量 Q_1 的分布曲线图

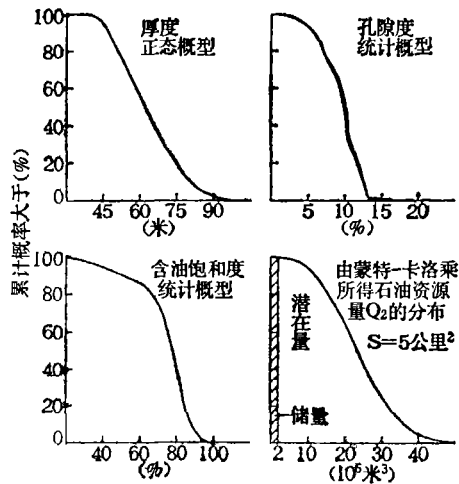


图 2 某油田长-8油层组参数正态概型统计模型模拟及石油资源量 Q_2 的分布曲线图

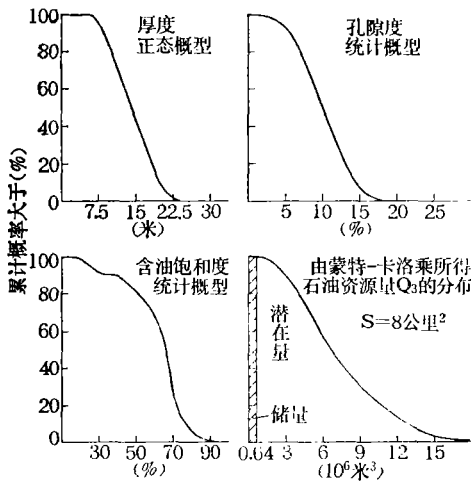


图 3 某油田长-9油层组参数正态概型统计概型模拟及石油资源量 Q_3 的分布曲线图

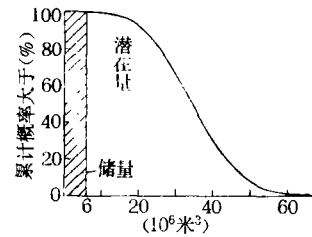


图 4 由长-8和长-9油层组组成的地质体按蒙特卡洛加所得石油资源量 Q_4 的分布图

图1、图2是统计了某油田长-8和长-9油层组七口井的资料之后，对所选择的参数进行概型模拟所得出的累计概率分布曲线，以及这些参数组合的蒙特卡洛乘结果。在所统计的参数中，面积一项是根据七口井可能的控制范围而推断的，作常数看待。原油比重和体积系数也暂定为常数。

图4是以长-8和长-9油层组作为两个独立的地质体单元，并把它们的石油资源量累计概率分布曲线 Q_2 、 Q_3 作蒙特卡洛加所得的结果。

图1与图2中的 Q_1 与 Q_2 的累计概率分布是几乎一致的，由此得出参数的概型模拟，当统计的参数的原始数据比较充分时，可采用直接统计的概型；当原始数据比较少时，应当选择假定的概型。但这种选择仍然应以现有的该参数资料为基础，由地质人员经过慎重的考虑和对比之后而确定。在某些情况下甚至可通过现有的原始地质资料使用地质类比法，由地质人员直接给出该参数的估计分布。

某油田长-8、长-9油层组按蒙特卡洛法计算的石油资源量分布表 表 2

地质单元	概型选择				资源量概率分布 ($10^6 M^3$)						
	含油层厚度	孔隙度	含油饱和度	含油面积	100%	90%	70%	50%	30%	20%	0%
长-8 (Q_1)	正态	正态	正态	常数	4	13.5	18.5	22	26	29.5	56
长-8 (Q_2)	正态	统计	统计	常数	2	12.5	19	23.5	28.5	32	54
长-9 (Q_3)	正态	统计	统计	常数	0.64	3.3	5.1	6.6	9	10.3	20.48
长-8和长-9 蒙特卡洛加 (Q_4)					6	21.5	28.5	34	40	44	74

表2是依据图1至图4蒙特卡洛乘的结果列出的石油资源量的分布状况。表明了长-8油层组的资源量 Q_2 的分布范围是2—54百万立方米之间，称为潜在量，即累计概率100%至0%所对应的点。100%累计概率点2百万立方米，称作储量，或称开采储量。严格地说，这个储量是指不超过2百万立方米的概率（可能性）为100%，若以90%累计概率所

对应的潜在量称为地质储量，则长-8油层组的地质储量为12.5百万立方米，把50%累计概率对应的潜在量称为期望储量，则该油层组的期望储量为23.5百万立方米。

表2也同时列出了长-9油层组以及长-8、长-9油层组作蒙特卡洛加之后的石油资源量的分布状况，即 Q_4 是以 Q_2 与 Q_3 作蒙特卡洛加之后的结果。由图4可看出 Q_4 的开采储量有明显的右移，为6百万立方米，地质储量为21.5百万立方米，期望储量为34百万立方米，而潜在量的分布是在6—74百万立方米之间。

为了与体积平均法计算的结果进行比较，选取了广东三水盆地三水农场断块，按上述方法对其资源量进行了估算¹⁾。

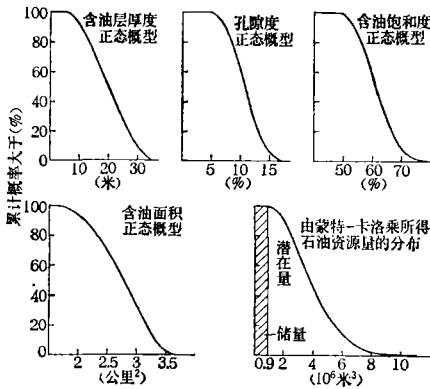


图5 三水盆地三水农场断块石油参数及资源量模拟分布图

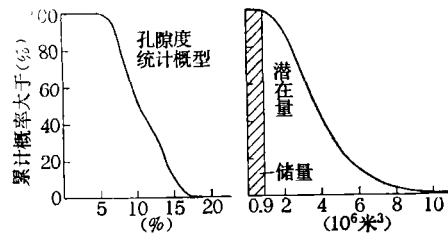


图6 三水农场断块以孔隙度为统计概型时石油资源量模拟分布图 (其它参数为正态概型)

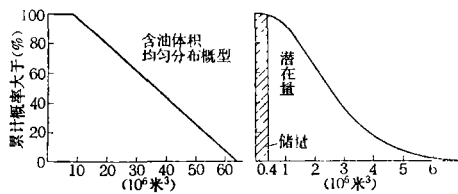


图7 三水农场断块以含油体积为均匀分布概型时石油资源量模拟分布图 (其它参数为正态概型)

图5至图7为所选择参数的概型模拟及蒙特卡洛乘的结果。图5是将所模拟的三水农场断块的含油层厚度、孔隙度、含油饱和度及面积作为正态概型进行模拟。图6和图7是为了进一步比较参数的不同概型选择对资源量分布的影响程度。在图6中，仅将孔隙度改为统计概型，图7改动比较大，采用含油体积为均匀分布概型。按上述不同概型组合后所得的资源量分布列表3。

表4是按体积平均法计算所得的三水农场断块的石油储量，分四层计算，合计314万吨。

1) 该断块的主要储油层为下第三系埤心组三段。分4个油层组。数据主要根据钻井资料统计。

三水农场断块不同概型组合的石油资源量分布比较表

表 3

概型选择					资源量概率分布							
含油层厚度	孔隙度	含油饱和度	含油面积	含油体积	100%	90%	70%	50%	30%	30%	0%	单位
正态	正态	正态	正态		0.9	2	2.9	3.8	4.8	5.4	12.6	10 ⁶ 米 ³
					0.67	1.49	2.16	2.83	3.57	4.02	9.21	10 ⁶ 吨
正态	统计	正态	正态		0.9	1.9	3	3.6	4.7	5.4	12.0	10 ⁶ 米 ³
					0.67	1.41	2.23	2.68	3.5	4.02	8.93	10 ⁶ 吨
	统计	正态		均匀	0.4	1.15	1.8	2.5	3.25	3.8	7.4	10 ⁶ 米 ³
					0.3	0.86	1.34	1.86	2.42	2.83	5.51	10 ⁶ 吨

三水农场断块石油储量平均体积法计算表

表 4

项目 油层编号	含油层厚度 (米)	孔隙度 (%)	含油饱和度 (%)	面积 (平方公里)	比重 (吨/立方米)	体积系数	储量 (万吨)	合计 (万吨)
1	7.5	12	55	2.69	0.841	1.13	99	
2	5.7	14	75	1.76	0.841	1.13	78	
3	5.4	9.7	56	3.22	0.841	1.13	70	
4	5.6	7.7	62	3.38	0.841	1.13	67	314

由图5、图6和表3说明，当参数的原始数据比较充分时，应用统计概型是可取的，其蒙特卡洛乘的结果，即资源量的分布是基本一致的。直接采用统计概型的优点是计算简单，节省用机时间，没有假设参数概型模拟的成分，代表了实际统计的本来面目。根据计算，其潜在储量为67—900万吨，开采储量在67万吨以内，期望储量为268万或283万吨，而地质储量为141万或149万吨。若以蒙特卡洛法估算的结果与体积平均法比较，则体积平均法计算的314万吨（ $4.22 \times 10^6 M^3$ ）石油储量，相当于图5石油资源量累计概率分布曲线上41%的累计概率点，或相当于图6上40%的累计概率点，以期望储量（50%累计概率点）为268万吨或283万吨比较，那么体积平均法计算的三水农场断块314万吨的储量略为偏高。但应该说明的是，上述按蒙特卡洛法统计的三水农场断块的含油面积的数据是来源于体积平均法的数据。所以在确定其面积是正态概型模拟时，是以体积平均法中最大含油面积3.38平方公里为下项。这个下项值的取法是比较保守的。因为实际上取到3.38平方公里面积的累计概率并不一定接近零。因此，在这个意义下，蒙特卡洛乘的结果，即资源量的分布也略为保守。

图7与表3也同时表明采用含油体积为均匀分布概型时，三水农场断块资源量的分布状况。由于掌握资料有限，在确定含油体积的最小值和最大值时，仅采用各含油层的4

个含油层平均厚度与相应的面积相乘,把这4个乘积逐一累加,将其中的最小值7.04百万立方米,最大值63.53百万立方米作为含油体积均匀分布概型的模拟范围。这样的取值也较粗略,且与面积下项值的确定一样,体积最大值65.53百万立方米的取值,其累计概率点不一定接近零。一般最好应用等厚线方法来累计确定含油体积的最大值和最小值更为精确而合理。尽管如此,本文也将其作为一种概型模拟的实例列出,以供参考。

四、几 点 结 论

1.应用蒙特卡洛法所估算的油气资源量是一个数域,对所模拟参数的概型和个数的选择可与地质工作者所掌握的资料多寡和经验相结合,因而具有较好的灵活性和适应性。

2.这个方法由于采用计算机来实现,因此比较快速,原始数据也较易于整理。若将数据组织成数据文件,可以随着普查勘探程度的深入进行修改或更新数据,或者改变参数概型模拟及组合,使资料得到更进一步的估算。

3.应用蒙特卡洛法,可以得到各大油气区以至全国范围的油气资源量的概率分布状况。

4.这个方法也可以用来对未知油气区的油气资源量进行估算。一般是通过与已知油气区的类比来确定未知区相应参数的概型分布和组合。但这种估算须要根据经验和可能掌握的资料,将估算的资源量累计概率再乘上一个小于1的所谓风险系数。显然,所得的资源量累计概率分布是小于100%,其表示的资源量均是潜在量。

(收稿日期 1981年8月6日)

参 考 文 献

[1] 李惕碚,实验的数学处理,科学出版社,1980。

[2] C.波珀,应用蒙特卡洛法分析玛塔-阿西玛油田,第十届世界石油会议报告论文集,第二分册,1980。

[3] 北京工业大学计算站等编著,电子计算机常用算法,科学出版社,1976。

PETROLEUM RESOURCE ESTIMATION AND THE APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD

Lin Junxiong

(Central Laboratory of Petroleum Geology, Ministry of Geology)

Abstract

This article describes in detail some fundamental concepts of the Monte Carlo Method in estimating petroleum resource with the formula of the volumetric method. The computer program is also presented.

The author made an estimate for petroleum resource of two oilfields with the Monte Carlo Method. Different models of probability of the main parameters, such as oil saturation, porosity and volume of oil-bearing rocks, which would affect the estimate of petroleum resource were simulated.

The results of petroleum resource estimation obtained in the simulations suggest that the estimate using statistical models of probability of a parameter is close to that obtained from the normal distribution model of probability derived from simulation, when sufficient original data of the parameter are available. Therefore, a parameter can be simulated with normal distribution model of probability when original data of the parameter are insufficient.

In estimating petroleum resource, the Monte Carlo Method can be applied in combination with both the experiences of geologists and the actual geological data, no matter the geological data much or few. It can be considered as a practical method and widely applied in estimating oil and gas resources of various areas at different exploration stages.