估计石油潜在储量的蒙特卡洛模拟法

于 志 钧

（华东石油学院）

蒙特卡洛（Monte—Carlo）方法是近年来发展起来的实用计算方法，对于解决若干重大计算课题有着重要意义。它是一种通过生成伪随机数进行模拟的方法，可用于研究变量的统计分布问题。

含油盆地的石油潜在储量是含油面积、储层厚度、储层孔隙度和含油饱和度等变量的函数。按传统计算方法，给这些变量以确定的数值，用下述公式计算：

$$Q = A \cdot h \cdot \phi \cdot S_o \qquad (1)$$

式中：Q—石油储量（米^3）

A—含油面积（米^2）

h—油层厚度（米）

ϕ—油层孔隙度（%）

S_o—含油饱和度（%）

显然这样的计算是不合理的，因为它不能说明计算结果的可靠性。为弥补这个缺陷，又提出了储量分级，即根据勘探程度分为A_1、A_2、B、C_1、C_2等储量级别。尽管如此，各级的可靠程度则依次下降，无疑这种作法是牵强的。

我们知道，公式（1）中的各项计算参数都是通过钻探从地下取出的岩芯样品测定的。这是从总体取样问题。即每个样品的取值决定于总体分布，也是样品取什么值决定于总体（地下储层）的概率分布，其取值范围都与确定的概率相联系，因此计算的储量也应与确定的概率相联系。这样的计算将比较合理，它能在估计储量值的同时说明获得某一储量的可能性有多大。这一思想与传统体积法有着根本区别，而蒙特卡洛法便是从上述思想出发所提出的一种方法。

一、蒙特卡洛模拟

根据一些油田的统计，石油储量计算参数大多是遵从正态分布律或其对数遵从正态分布律。但是，这些参数往往受取样数量和取样点在空间分布（井位与取样井段）的限制，实际样品在总体分布上带有很大片面性。特别对可能含油面积，通常仅能提出3—5个数据（正在开采的含油面积、已经探明的含油面积、有利的含油面积、最大圈闭面积等）；含油饱和度的数据也不会很多。

蒙特卡洛模拟样品分布律，是先根据实际样品的测值计算正态分布的二个统计特征数：平均数a及标准方差σ。接着生成一个均匀分布的伪随机数。然后，把均匀分布伪随机数变换为正态分布随机数并按样品的统计特征数a、σ插入，得出模拟样品分布，绘出分布曲线。这就是蒙特卡洛模拟的实质。

1.伪随机数发生器

蒙特卡洛模拟的第一步是生成均匀分布的伪随机数。

在（a、b）区间均匀分布的密度函数：

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{b-a} & (当a\leqslant x<b)\\ 0 & (当x<a,\ x\geqslant b)\end{cases} \qquad (2)$$

分布函数：

$$F(x)=\begin{cases}0 & (当x<a)\\ \dfrac{x-a}{b-a} & (当a\leqslant x<b)\\ 1 & (当x\geqslant b)\end{cases} \qquad (3)$$

生成伪随机数的模型称之为伪随机数发生器。真正的随机数是从总体中随机抽取的样品。例如，有0、1、2、……、9十种符号，从中分二次，每次抽取一个符号，组成一个二位的十进位制数。这是真正的随机数。但是在科学计算中不能靠这种办法生成随机数，而是建立一个数学模型计算随机数。这样生成的随机数不是真正抽样得出的随机数，故称之为伪随机数。由于生成的伪随机数需要以千、万计，所以只有使用电子计算机才能实现。因之我们把生成伪随机数的计算机程序称之为伪随机数发生器。

2.生成伪随机数的同余法

先介绍同余的概念。有两个整数S与t，当S与t之差被M除尽时，称S以M为模与t同余，记作

$$S=t \bmod M \qquad (4)$$

例： $19=9 \bmod 5$

因为 $(19-9)/5=2$

若S与t满足（4），则有下述关系：

a，S与t除以M时，有相同的余数。

例： $\frac{19}{5}=3$ 余4

$\frac{9}{5}=1$ 余4

b，$S-t=i\cdot M$（i为整数） （5）

例： $19-9=2\times5$

由上述关系出发，给定t与M，S可以有许多可能的解。

例：$S=26\bmod6$

这时 $t=26$，$M=6$

按（5）式关系，可以有

$i=1 \quad S-26=1\times6 \quad S=32$；

$i=0 \quad S-26=0\times6 \quad S=26$；

$i=-1 \quad S-26=-1\times6 \quad S=20$；

$i=-2 \quad S-26=-2\times6 \quad S=14$；

$i=-3 \quad S-26=-3\times6 \quad S=8$；

$i=-4 \quad S-26=-4\times6 \quad S=2$；

$i=-5 \quad S-26=-5\times6 \quad S=-4$。

t以M为模的最小的正同余数为2，即

$$S_{LP}=t-[t/M]M \qquad (6)$$

这里$[t/M]$为商的截整，即不大于t/M的最大整数。

例：在上面的例子中

$$S_{LP}=26-[26/6]\times6=26-4\times6=2$$

我们定义t以M为模的幂余数为

$$S_n=t^n \pmod{M}$$

$n=1、2、……$

其中每个S_n均取最小的正同余数。这样，以$t=5$及$M=31$为例，则有

$$S_1=5^1(\bmod 31)=5-\left[\frac{5}{31}\right]\times31=5-0\times31=5$$

$$S_2=5^2(\bmod 31)=25-\left[\frac{25}{31}\right]\times31=25-0\times31=25$$

$$S_3=5^3(\bmod 31)=125-\left[\frac{125}{31}\right]\times31=125-4\times31=1$$

$$S_4=5^4(\bmod 31)=625-\left[\frac{625}{31}\right]\times31=625-20\times31=5$$

……（以下为循环数列）

这是一个周期性的随机数列。我们利用幂余数的概念使用电子计算机生成伪随机数。模型如下：

$$u_{n+1}=Cu_n(\bmod 2^d) \qquad (7)$$

这里U_n是上一步生成的伪随机数；d由计算机字长决定，原则是$C\cdot2^d$不超过字长，以32位字长为例的数符占1位，$C\cdot2^d$最大不能大于2^{31}。C是乘积常数，作用是增大伪

随机数的周期。

计算伪随机数公式为

$$u_{n+1} = Cu_n - \left[\frac{Cu_n}{M}\right] \cdot M \qquad (8)$$

式中括弧内为商的截整。计算步骤如下：

首先给伪随机数赋初值u_0及给定乘积常数C。选值使$C \times M$不大于2^{31}而又使$\frac{M}{C}$是一个较小的数，也就是说生成的随机数基本上均匀分布在0—M的数域上。但M不能取值太小，否则将大大缩短伪随机数的周期。这样，将使生成的伪随机数周期长、随机性好。

3.均匀分布随机数变换为正态分布随机数,生成均匀分布伪随机数不是最终的目的，我们要求的是生成正态分布随机数。

假设需要得到具有分布密度$f_\xi(X)$的随机数Xi，其数学期望为a，标准方差为σ，则有

$$f_\xi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \qquad (9)$$

根据中心极限定理，若相互独立的随机变量ξ_1、ξ_2……具有相同的概率分布，同时每个ξ_i ($i=1$、2……、n）具有期望值a、及标准方差σ_1。那么，和数

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \cdots\cdots + \xi_n$$

接近正态分布。期望值$a = na_1$；标准方差$\sigma = \sigma_1\sqrt{n}$。当$n = 8 \sim 12$，ξ逼近正态分布。

利用上述原理，对生成的伪随机数依次求每10个数之和（$n=10$），就获得正态分布随机数。

假设测定样品的期望值为A，标准方差为B。按下述公式把变换的正态随机数插入样品分布区间：

$$X_K = B\,(\xi/M - 5) + A \qquad (10)$$

式中减5是因为随机数ξ/M的平均值等于5。

二、利用蒙特卡洛拟模评价含油盆地潜在储量

对于钻井勘探取得的储油圈闭面积（A）、储层厚度（h）、孔隙度（φ）、含油饱和度（S_o）等四种数据，分别按上述方法进行蒙特卡洛模拟，求得各自的概率及累计概率分布曲线（图1）。

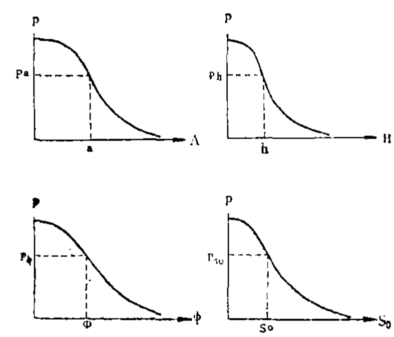

图1 含油面积（A）、储层厚度（H）、孔隙度（φ）及含油饱和度（So）的累计概率分布曲线示意图

这样，按公式（1）的计算参数将有许多组参数组合，每一组合的概率是各自单独概率的乘积，有

$$P = P_A \cdot Ph \cdot P \cdot P_{S_o} \qquad (11)$$

其对应储量为

$$Q_P = A \cdot h \cdot \phi \cdot S_o$$

于是得出可能的石油潜在储量累计概率分布，据此绘出含油盆地潜在石油储量分布曲线（图2）。

图2中Q_1的概率为100%，是正在开采的石油储量；已探明储量可按概率为90～95%取值；远景储量可按概率为80～85%取值。这是经验指标，具体含油盆地可按具体的地质条件决定概率的取值范围。

图3是对一个假想的含油盆地用蒙特卡洛法计算的潜在石油储量分布曲线，储量单

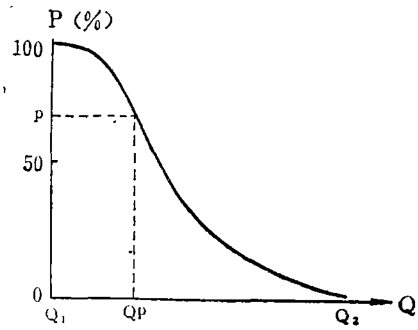

图 2　含油盆地潜在石油储量分布曲线示意图

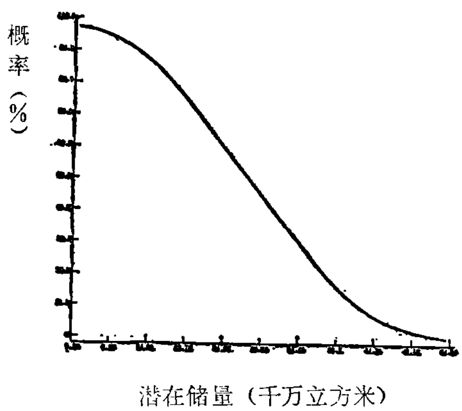

图 3　计算机计算输出的潜在石油储量分布曲线（假设例）

位为千万米^3。从图中可看出，正在开采的储量为5千万米^3；已探明储量（按概率为流90%计）为14.3千万米^3；远景储量(按概率为80%计）为17.3千万米^3。

三、计算机程序（FORTRA IV）

1.功能

本程序通过控制卡片可连续对任意个样品的测定值进行蒙特卡洛模拟并自动打印概率分布曲线。控制卡片格式如下：

1—3列为IS；

4—6列为IT；

7—9列为N。

当IS≒1时处理样品数据；当IS＝1时停机。

当IT＝1时为常用数分布；当IT≒1时为对数分布。

N是样品测值数目。

本程序最多可以生成10^6个均匀分布伪随机数和10^5个正态分布随机数。这通过改变N1的赋值确定。

2.输入数据

本程序为节省内存，采取分批输入一维数组X。每组数据前放一张控制卡片（见前)，控制当处理完一组数据后处理下一组数据或决定停机。每组数据个数不一定相等。

3.符号说明

AXR—变量的区间平均值；

AM—区间测值计数器，记录落入各区间的数据个数；

P—与各统计区间对应的概率分布；

SSP—与各统计区间对应的累计概率分布；

XZ—横坐标轴标度；

NI—生成正态随机数的个数；

STDEV—样品标准方差；

AMEAN—样品平均值；

XMAX—样品最大测值；

XMIN—样品最小测值；

IXO—伪随机数初值；

1003—乘积常数；

1000003—伪随机数的模M；

Y—纵坐标轴的标度；

OD—纵坐标轴刻度。

4.子程序

（1）计算平均值及标准方差子程序VAR：

```
SUBROUTINE  VAR (STDEV,
  AMEAN,NS)
COMMON X(1000)
SUMX=0.
SUMX2=0.
```

```
      DO 1 I=1, NS
      SUMX=SUMX+X(I)
    1 SUMX2=SUMX2+X(I)*X(I)
      VAR1=(FLOAT(NS)*SUMX2-
     SUMX**2)/FLOAT(NS*(NS-
     1))
      STDEV=SQRT(VAR1)
      AMEAN=SUMX/FLOAT(NS)
      WRITE (108,1000) AMEAN,
     STDEV
      RETURN
 1000 FORMAT(/,8X,F10.3,2X,F10.3)
      END
```

（2）打印分布曲线子程序MAP:

```
      SUBROUTINE MAP(P, XZ, Y,
     OD)
      DIMENSION P(50), OD(51), Y
     (11),XZ(51),IOUT(100)
      DATA ILANK, ISTAR/'','*'/
      WRITE(108,1001)
      DO 30 M=1,51
      DO 40 I=1,100
   40 IOUT(I)=ILANK
      N1=0
      N2=1
    3 DO 4 I=N2,50
      IF(OD(M)-100.0*P(I).EQ.1.0)
     P(I)=P(I)+0.001
      IF (ABS(OD(M)-100.0*P(I)).
     LT,1.)GO TO 20
    4 CONTINUE
      GO TO 7
   20 IOUT(2*(I-1)+1)=ISTAR
      N2=I+1
      IF(I.EQ.51) GO TO 7
      GO TO 3
    7 DO 10 L=1,11
      IF(OD(M) .EQ. Y(L)) GO TO 2
   10 CONTINUE
      GO TO 6
    2 WRITE(108,1002) Y(L), (IOUT
     (J),J=1,100)
      GO TO 30
    6 WRITE(108,1003) (IOUT(J), J=
     1,100)
   30 CONTINUE
      WRITE(108,1004)
      WRITE(108,1005) (XZ(I), I=1,
     51,5,)
      RETURN
 1001 FORMAT(1HO)
 1002 FORMAT(5X,F5.1,'+',100A1)
 1003 FORMAT(10X,'I',100A1)
 1004 FORMAT (10X, '+', 10('………
     +'))
 1005 FORMAT(4X,11F10.2)
      END
```

5.主程序

```
      DIMENSION AXR(50), AM(50),
     P(50),SSP(50),XZ(51)
     1,RDO(10), OD(51), Y(11)
      COMMON X(1000)
      DATA Y/100.,90.,80.,70.,60.,
     50.,40.,30.,
     120.,10.,0./
      IXO=1000001
      N1=500
      M1=10
  100 READ(105,1000) IS,IT,N
      IF(IS.EQ.1) GO TO 104
      READ(105,1001)(X(I),I=1,N)
      IX=IXO
      IX1=IXO
      K=0
      IF(IT.EQ.1) GO TO 101
```

```
      DO 2 I=1,N
      AX=X(I)
    2 X(I)=ALOG(AX)
  101 CALL VAR(STDEV,AMEAN,N)
      XMAX=0.0001
      XMIN=10.E+10
      DO 3 I=1.N
      IF(X(I). GT. XMAX)  XMAX=
        X(I)
      IF(X(I).LT.XMIN)  XMIN=X(I)
    3 CONTINUE
  102 RSUM=0.0
      DO 4 I=1.10
      IY=1003*IX
      IF(IY-1000003) 18,18,19
   18 IY=IY+1000003+1
   19 YFL=IY
      NN=YFL/1000003.
      IY=IY-NN*1000003
      IX=IY
      IF(IX.EQ.IX1) IX=IX+1
      IF(IX.NE.IX1) GO TO 17
      IX1=IX
   17 RX=FLOAT(IX)
      RDO(I)=RX
    4 RSUM=RSUM+RDO(I)
      K=K+1
      X(K)=STDEV*(RSUM/1000000.
        -5.)+AMEAN
      IF(K.EQ.N1) GO TO 103
      GO TO 102
  103 AN=100.
      DX=(XMAX-XMIN)/AN
      XX=XMIN
      DO 5 L=1,51
      XZ(L)=XX
    5 XX=XX+2.0*DX
      DO 6 L=1,50
      AM(L)=0.
    6 AXR(L)=0.
      DO 7 L=1,50
      DO 8 I=1,N1
      IF(X(I).GT.XZ(L). AND. X(I).
        LE.XZ(L+1)) GO TO 20
      GO TO 8
   20 AM(L)=AM(L)+1.
      AXR(L)=AXR(L)+X(I)
    8 CONTINUE
      IF (AM(L) .NE. 0.0) GO TO 1
      GO TO 10
    1 AXR(L)=AXR(L)/AM(L)
   10 IF(IT .EO. 1) GO TO 7
      REX=AXR(L)
      AXR(L)=EXP(REX)
    7 CONTINUE
      SP=0.0
      DO 11 L=1,50
   11 P(L)=AM(L)/FLOAT(N1)
      DO 9 L=1,50
      L1=51-L
      SP=SP+P(L1)
    9 SSP(L1)=SP
      WRITE(108,1002) (AXR(L),L=
        1,50)
      WRITE (108,1002)  (P (L). L=
        1,50)
      WRITE(108,1002) (SSP (L), L=
        1,50)
      XX=100.
      DO 14 I=1,51
      OD(I)=XX
   14 XX=XX-2.0
      CALL MAP(SSP,XZ,Y,OD)
      GO TO 100
  104 STOP
 1000 FORMAT(3I3)
```

技术与方法

贵州志留系牙形刺的颜色及其石油地质意义

周 希 云

（贵州第八普查勘探大队）

一 前 言

牙形刺是一种尚不清楚的海生动物骨骼化石，单个刺体通常只有0.1—1毫米大小。在寒武纪至三叠纪的海相沉积（尤其是碳酸岩）中分布广泛，是划分对比地层的重要化石之一。利用牙形刺的颜色作为有机质变质作用的指标，首先是由Epsfein等（1674，1975，1977）提出来的。这是一种既迅速又经济的方法，只需要一般的实验技术和一台双目立体显微镜，尤其适用于海相碳酸盐岩广布地区。

我国这方面的研究刚开始，目前只蒋武（1980）有过另星报道。

贵州志留系牙形刺颜色多样，在时间及空间有着规律的分布，它所揭示的有机质变质程度与其它有机地化指标有较大的一致性。本文仅对这方面有关问题作初步探索。

八普实验室张志芳同志在牙形刺的升温试验过程中给了大力帮助，表示感谢。

```
1001  FORMAT(8F10.2)
1002  FORMAT(1HO,10F10.3)
      END
```

四、结 束 语

目前在国外（美国、加拿大、澳大利亚、法国等）广泛使用蒙特卡洛法估计含油盆地潜在储量。美国每年都根据新资料对各含油区进行一次普遍的蒙特卡洛模拟计算，对勘探方向有重大的指导意义。

从引用蒙特卡洛法评价含油盆地的试算来看，该法有重要价值。本文是根据我们的初步工作成果，对该法作详细介绍并给出FORTRAN IV程序。

蒙特卡洛法也适用于其它金属与非金属矿产资源的远景评价，从事非石油矿产储量计算工作的同志可以引用。

参 考 文 献

[1] 1973, Richard V. Andree, Josephine P. Andree and David D. Andree, Computer programming techniques, Analysis, and mathematics, Prentice-Hall, Inc.

[2] 1965, Shan S. Kuo, Numerical methods and computers, Addison-Wesley publishing, Inc.