

文章编号:1001-1986(2006)06-0030-03

## 蒙特卡罗法在煤层气资源量计算中的应用

陈玉华,杨永国,秦 勇

(中国矿业大学资源与地球科学学院,江苏 徐州 221008)

**摘要:**将蒙特卡罗(Monte-Carlo)法引入煤层气资源量计算,可弥补容积法视各参数为常数的不足。重点论述了蒙特卡罗法用于煤层气资源量计算的主要算法和函数实现,包括参数选择、分布函数确定、伪随机数的产生以及对伪随机数参数值的确定。利用上述算法自主开发了蒙特卡罗法软件。研究实例表明,在数据样本较多的情况下,该算法与容积法能保持较小误差范围且有更高的可信度。

**关键词:**蒙特卡罗法;煤层气资源量;算法实现

**中图分类号:**P618.11 **文献标识码:**A

## Arithmetic realization of Monte-Carlo method on calculating coalbed gas resource

CHEN Yu-hua, YANG Yong-guo, QIN Yong

(School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The Monte-Carlo method can resolve the problem that every parameter is often regarded as a constant during the process of calculating coalbed gas resource. This paper mostly describes the main arithmetic and functions realization in calculating coalbed gas resource by Monte-Carlo method, which includes parameter choice, definition of distribution function, generation of false random number and evaluation of the parameter corresponding to false random number. The Monte-Carlo software is programmed by above arithmetic and the software example shows that there is small difference in results between two methods, and Monte-Carlo method has more reliability.

**Key words:** Monte-Carlo method; coalbed gas resource; arithmetic realization

## 1 引言

煤层气作为一种非常规天然气,其储层是裂隙-孔隙型的双重孔隙介质储集层,煤层气主要以吸附状态赋存于煤储层当中。由于煤层气井产出的动态与常规油气井有明显不同,所以不能直接将计算石油和常规天然气资源量的方法引入到煤层气资源量计算中。近年来,煤层气资源量计算一般采用容积法。文献[1-3]对容积法的具体使用条件和方法有明确的介绍。在容积法中,视每个地质参数为常数来计算资源量,但是,实际观测得到的每个计算参数的数据,是该参数总体中的一个随机抽样观测值。因此,为了更接近实际,本文尝试采用蒙特卡罗法进行煤层气资源量的计算。

蒙特卡罗法又称随机抽样技巧法<sup>[4-5]</sup>,被广泛应用于地质、工程等方面<sup>[6-7]</sup>。该方法利用地质参数的抽样序列,得到概率统计模型,最终得到相应概率下问题的渐近值。

## 2 蒙特卡罗法算法描述

## 2.1 地质参数选取

煤层气资源量计算常用的容积法,如下式:

$$Q = A \cdot H \cdot D \cdot q, \quad (1)$$

式中  $Q$  为煤层气资源量( $\text{m}^3$ );  $A$  为计算范围面积( $\text{m}^2$ );  $H$  为煤层厚度( $\text{m}$ );  $D$  为煤层的容重,干燥基( $\text{t}/\text{m}^3$ );  $q$  为煤层甲烷含量,干燥基( $\text{m}^3/\text{t}$ )。

用蒙特卡罗法进行煤层气资源量计算时,对(1)式中地质参数的取值,除计算范围面积( $A$ )是常数外,其他3个参数都是各参数本身在其参数总体中的一个随机抽样值。

2.2 地质参数( $H$ 、 $D$ 和 $q$ )概率分布函数的求取

对于求取煤层厚度( $H$ )、煤层容重( $D$ )和煤层甲烷含量( $q$ )3个地质参数的分布函数,虽然它们的确定原理相同,但是对于每一个地质参数,要根据实际资料来确定分布类型,一般做法如下<sup>[8]</sup>(以煤层厚度  $H$  为例):

收稿日期:2006-03-14

作者简介:陈玉华(1978—),男,安徽淮北人,中国矿业大学助教,主要从事数学地质教学和研究。

**2.2.1** 当  $H$  参数样本较多时,可用频率统计法求其经验分布函数。

a. 选出  $N$  个  $H$  参数样本的最大值  $H_{\max}$  和最小值  $H_{\min}$ ;

b. 求极差  $H_L = H_{\max} - H_{\min}$ ;

c. 将极差分为  $K$  等分,每份长为  $H_L/K$ ,以构成  $K$  个区间;

d. 以  $H_{\min}$  为起点,以  $H_L/K$  为增量,求  $K$  个区间的界点;

e. 把  $N$  个  $H$  参数样本逐个与区间的临界点进行比较,统计出每个区间落入的数据个数,再除以  $N$  得到频率。由  $H_{\min}$  一端起,逐个对频率进行累积,可得出  $K$  个区间的  $F(H)$  的值,从而求得区间  $(H_{\max}, H_{\min})$  上的分布函数  $F(H)$ 。

**2.2.2** 当数据个数较少,但知道该参数的分布类型时,可由该参数的分布类型给出分布函数。

许多地质变量都服从正态分布或对数正态分布,可由已有的数据求出平均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$ ,从而得出分布函数  $F(h)$ 。

**2.2.3** 当已知参数只有两个时,则认为该参数是服从均匀分布的随机变量。

$$F(h) = \begin{cases} 1, & \text{当 } h \leq a \text{ 时;} \\ \frac{b-h}{b-a}, & \text{当 } a < h \leq b; \\ 0, & \text{当 } h > b \text{ 时。} \end{cases} \quad (2)$$

**2.2.4** 当已知数据为 3 个时,则采用三角分布。

将已知数据中的最小值  $a$ ,最大值  $b$ ,看作参数可取值的最小和最大值,而中间值  $c$  看作参数的可能取值,三角分布函数为:

$$F(h) = \begin{cases} 1, & \text{当 } h \leq a \text{ 时;} \\ 1 - \frac{h-a}{(b-a)(c-a)}, & \text{当 } a < h \leq c; \\ \frac{(h-b)^2}{(b-a)(b-c)}, & \text{当 } c < h \leq b; \\ 0, & \text{当 } h > b \text{ 时。} \end{cases} \quad (3)$$

**2.3 地质参数( $H$ 、 $D$  和  $q$ )伪随机数的生成与求取**

用蒙特卡罗法模拟资源量需要用大量的随机数,目前,混合同余法<sup>[4-5]</sup>是生成随机数的一个较好的数学方法。

在上述随机变量中随机取一值,即可得到  $Q_1 = A \times H_1 \times D_1 \times q_1$ 。同样,如此进行下去,可以得到一组  $Q$  的样本,用此样本近似作为  $Q$  的分布。具体做法如下<sup>[8]</sup>:

a. 求出  $Q$  的最大值和最小值:

$$Q_{\max} = A \times H_{\max} \times D_{\max} \times q_{\max};$$

$$Q_{\min} = A \times H_{\min} \times D_{\min} \times q_{\min};$$

b. 求极差  $Q_L = Q_{\max} - Q_{\min}$ ;

c. 将极差分为  $K$  个区间,每个区间长度是  $Q_L/K$ ;

d. 以  $[0,1]$  上均匀分布的随机数作为随机变量  $H$ 、 $D$  和  $q$  分布函数的概率入口;用线性插值计算出随机变量  $H$ 、 $D$  和  $q$  的出口值,这个出口值就是一次抽样。对随机变量  $H$ 、 $D$  和  $q$  各随机抽样  $n$  次,统计  $K$  个区间的频数,从而得到资源量的分布函数。

### 3 蒙特卡罗法的算法实现

为了计算煤层气资源量,笔者依托面向对象的 C++ 语言,研发了蒙特卡罗算法软件,建立了 CMonteCarloClass 类,用于完成用蒙特卡罗法计算煤层气资源量的功能。

#### 3.1 算法实现的主要步骤

a. 输入原始变量  $X_i$  数据,包括煤层厚度、甲烷含量和煤层容重等煤层气资源量计算参数的相关数据。这里,计算参数的输入,包括每个参变量的起始端点值、终止端点值、统计区间的个数以及表达式常数。煤层气资源量每个计算参数的起始值、终止值,分别对应该参数的最小值和最大值;统计区间个数是由煤层气资源量参数实测值平均划分而得。

b. 计算  $X$  的累积频率分布,并将其作为概率分布函数,模拟煤层气资源量参数分布律。

c. 生成伪随机数  $R_k$ 。

d. 求取对应于  $R_k$  的  $X_k$ ,并求出随机数  $R_k$  所对应的煤层气资源量参数值。

e. 按照  $R_k$  由大到小的次序,将对偶值  $(R_k, X_k)$  重新排序。删除  $R_k$  相同的重复对偶值  $(R_k, X_k)$ ,用线性插值法计算在 95%、50% 和 5% 概率下的煤层气资源量参数值。

#### 3.2 算法实现的主要函数

a. BOOL ReadFileFunction():该函数主要功能是读入煤厚、甲烷含量、煤层容重等煤层气资源量计算参数相关数据。

b. Void GetIntervalStart(float \* Vinter - valStar, int VNumber):该函数主要功能是生成煤层气资源量参数统计区间的端点对应值。

c. void GetCumulateFrequency(float \* Vdata, int n):其主要功能是计算特定地质参量的累积频率分布,模拟煤层气资源量参数分布律。

d. void GetPseRandomNum(float \* pfi, float \* PSRandom):其主要功能是生成伪随机数  $R_k$ 。

e. float GetValueByRk(float RandomK):其主要

功能是求出随机数  $R_k$  对应的煤层气资源量参数值。

f. void DelPseRandomETA(): 其主要功能是按照  $R_k$  由大到小的次序, 将对偶值 ( $R_k, X_k$ ) 重新排序。删除  $R_k$  相同的重复对偶值 ( $R_k, X_k$ ), 用线性插值法计算在 95%、50% 和 5% 概率下的煤层气资源量参数值。

#### 4 应用实例

某矿区因地质构造复杂, 煤层厚度表现出较大的浮动性。以一<sub>1</sub> 煤为例, 其位于太原组底部, 结构复杂, 夹矸多达 3~5 层, 煤厚 0~9.43 m。另外, 因受古地形影响, 该煤层在本区的西部和南部局部发育不好。从矿区内收集到的煤厚度参数资料(表 1)来看, 其煤厚参数在 1~10 m 的取样范围内, 一般 5~8 m。煤层气含气量主要受到煤层埋深、煤阶、构造复杂程度等因素影响。从矿区内收集到的含气量资料(表 2)来看, 在埋深 234.00~917.32 m 的取样范围内, 煤层气中  $\text{CH}_4$  含量为 0.15~28.3  $\text{m}^3/\text{t}$ , 一般为 10~25  $\text{m}^3/\text{t}$ 。从实例看出, 因受各种复杂因素的控制, 煤层气资源量的计算参数, 均表现出一定范围内的随机性。因此, 将实际观测到的每个计算参数的数据, 看作参数总体中的一个随机抽样观测值更加合理。

表 1 某矿区煤层厚度计算参数 m

Table 1 The calculation parameter of coalbed thickness of a mine

样本号	煤厚	样本号	煤厚	样本号	煤厚
1	6.08	12	6.9	23	1.54
2	9.02	13	1.06	24	7.44
3	1.54	14	5.38	25	6.53
4	7.32	15	2.07	26	7.02
5	4.38	16	1.19	27	6.13
6	6.56	17	6.5	28	5.52
7	8.45	18	11.48	29	6.44
8	4.97	19	5.35	30	7.03
9	7.36	20	6.38	31	5.77
10	3.47	21	5.69	32	6.4
11	5.54	22	5.55	33	5.65

利用蒙特卡罗法计算软件, 通过打开 \*.txt 文件, 设置不同计算区间和计算长度等量, 最终计算出该矿区的煤层气资源量。

采用体积法(如(1)式), 对上述资料进行处理, 得到  $Q = 11.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

采用蒙特卡罗法对上述资料进行处理, 其结果如下: 该矿区 5% 概率下煤层气资源量约为  $26.85 \times$

表 2 某矿区  $\text{CH}_4$  含量计算参数  $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$

Table 2 The calculation parameter of  $\text{CH}_4$  content of a mine

样本号	$\text{CH}_4$ 含量	样本号	$\text{CH}_4$ 含量	样本号	$\text{CH}_4$ 含量
1	14.7	12	18.99	23	6.13
2	24.75	13	27.5	24	3.76
3	20.1	14	23.48	25	19.08
4	25.39	15	10.55	26	16.24
5	20.88	16	16.18	27	17.19
6	27.54	17	21.52	28	28.3
7	19.06	18	27.7	29	21.48
8	21.48	19	22.81	30	6.9
9	23.47	20	22.88	31	8.81
10	23.9	21	4.18	32	11.52
11	15.61	22	21.72	33	0.15

注: 在数据资料中由于煤层的容重数据较少在此不予列出。

$10^8 \text{ m}^3$ ; 50% 概率下煤层气资源量约为  $10.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 95% 概率下矿区煤层气资源量约为  $1.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从处理结果可以看出, 50% 概率下矿区煤层气资源量与体积法计算得到的结果差约为  $0.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。50% 概率下矿区煤层气资源量小于体积法计算的资源量。从概率角度看, 也显示出蒙特卡罗法对于矿区煤层气资源量具有更高的可信度。另外, 在软件使用过程中, 当统计区间个数改变时会发生同一概率下资源量有较小的改变, 此现象的发生主要因为线性插值方法所引起。须说明的是, 当数据资料提供的样本较少时, 蒙特卡罗法计算结果与容积法计算结果会出现较大的误差。这是由于两种方法的计算原理不同所致。由于蒙特卡罗法的计算原理更符合实际地质情况, 所以在数据资料提供的样本较少时, 蒙特卡罗法的计算结果比容积法更合理。

#### 参考文献

- [1] 唐书恒. 煤层气资源量计算方法探讨[J]. 中国煤田地质, 1999, 11(1): 36~38.
- [2] 王星锦, 王伟. 煤层气储量计算方法[J]. 天然气工业, 1998, 18(4): 24~28.
- [3] 王素玲, 陈江峰, 潘结南. 煤层气资源量计算中的几个问题[J]. 煤炭技术, 1999, 18(1): 21~22.
- [4] 陆明德, 田时芸. 石油天然气数学地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 186~192.
- [5] 赵鹏大, 胡汪亮, 李紫金. 矿床统计预测[M]. 武汉: 地质出版社, 1983.
- [6] 姚宏, 李圭白, 张景成, 等. 蒙特卡罗方法在水污染控制理论中的应用前景[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(1): 129~131.
- [7] 吉庆丰, 郑帮民. 蒙特卡罗法在势流计算中的应用研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 415~419.
- [8] 石广仁. 地质中的计算机应用新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.