

# 地质统计学应用综述

李 黎, 王永刚

(中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061)

**摘要:**地质统计学是一门新兴的交叉学科,在石油勘探开发中的应用日益广泛。主要介绍地质统计学在石油勘探与开发中的应用,重点介绍了在储层预测、解决非均质性和各向异性、数据整合、储层建模及不确定性描述中的应用,并分析了地质统计学的局限性和发展方向。

**关键词:**地质统计学;变差函数;克里金;随机模拟;各向异性

**中图分类号:**P631.4

**文献标识码:**A

地质统计学是 20 世纪六七十年代发展起来的一门新兴的数学地质学科的分支,是随着采矿业的发展而兴起的一门交叉学科。20 世纪 50 年代,当发现传统的统计学方法不再适用于评价识别矿藏时,为了精确的估计矿块的品位,必须要考虑样品的尺寸以及相对于该矿块的位置,南非的采矿工程师克里金(D. J. Krige)和一个统计学家西舍尔(H. S. Sichel)开发了一种新的评价方法。法国著名学者马特隆教授(G. Matheron)将克里金的经验和方法上升为理论,从而创立了地质统计学。为了纪念这项技术基础体系的奠基人,马特隆教授将这门技术命名为“克里金”。70 年代后期,通过地质统计学的第 1 个商用软件包 BLUEPACK 的产生,地质统计学被引入到石油行业。80 年代中期,地质统计学被应用于石油行业的各个领域,其普及程度逐年增长<sup>[1,2]</sup>。地质统计学方法分为 2 个方向:①以法国马特隆教授等为主,致力于克里金估计的研究;②以美国 Journel 等为主,主要致力于随机模拟方法的研究<sup>[3]</sup>。1977 年地质统计学引入到我国,得到了广泛的重视与发展。侯景儒定义地质统计学是“以区域化变量理论为基础,以变异函数(变差函数)为基本工具来研究那些展布于空间并呈现出一定的随机性和结构性的自然现象(包括地质现象)的科学”<sup>[4]</sup>。国内外地质统计学的理论、方法及应用均达到了成熟的阶段,并形成了具有较好应用价值的软件。具有代表性的有:法国巴黎高等矿院地质统计学研究中心研制的 ISATIS;美国斯坦福大学应用地球科学系 C. V. Deutsch 和 A. G. Journel 共同编写的 GSLIB 程序包等等;北京科技大学地质系也编写出地质统计学方法研究程序集。

近年来,克里金技术在石油勘探开发中的应用日益广泛、深入,效果也越来越明显。主要应用包括:储层预测,即估计地层的埋深、层厚、孔隙度、渗

透率和含油饱和度等地质和地球物理参数的空间分布,绘制各种地质图件;利用地质统计学的变差函数研究储层的非均质性及各向异性;数据整合,即整合地震、测井、钻井和露头等各种信息并进行建模;建模。除此以外,随机模拟方法和油藏数值模拟相结合,可以预测油藏的动态特征,为制定和调整开发方案并提高采收率提供依据<sup>[5]</sup>。

## 1 地质统计学方法概要

地质统计学以区域化变量理论为基础,以变差函数为基本工具,是研究那些在空间分布上既具有随机性又具有结构性的自然现象的学科<sup>[4]</sup>。许多地质变量,如储层参数(孔隙度、渗透率、厚度、夹层数等)在空间既存在一定的空间分布规律(结构性)又存在局部的变异性(随机性),这就是区域化变量,因此可以用地质统计学方法来研究这些变量。实际上,地质统计学方法的应用都是基于二阶平稳假设和本征假设的。

### 1.1 变差函数

一维变差函数的定义为:假设空间点  $x$  只在一维  $x$  轴上变化,把区域化变量  $Z(x)$  在  $x, x+h$  两点处的值之差的方差之半定义为区域化变量  $Z(x)$  在  $x$  方向上的变差函数。在二阶平稳假设和本征假设的基础上,假设  $N(h)$  是间距为  $h$  的所有点对的总数,则变差函数的计算公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [X(u_i) - X(u_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中:  $N(h)$  是步长为  $h$  数据对的数目;  $X(u_i)$  和

收稿日期:2005-11-03; 改回日期:2006-01-20。

第一作者简介:李黎(1981—),女,2004 年在中国石油大学获得学士学位,现在中国石油大学攻读地球探测与信息技术硕士学位,主要从事地质统计学应用、储层预测等方面的学习与研究工作。

$X(u_i+h)$ 是相距为  $h$  的 2 点采样值。从变差函数的拟合图(图 1)可以看出,变差函数有 3 个基本参量:一是变程,用来度量空间相关性的最大距离,是变差函数达到某一稳定值时的空间距离;二是基台值,是变差函数在变程处达到的平稳值;三是块金值,表示当  $h=0$  时的变差函数值。

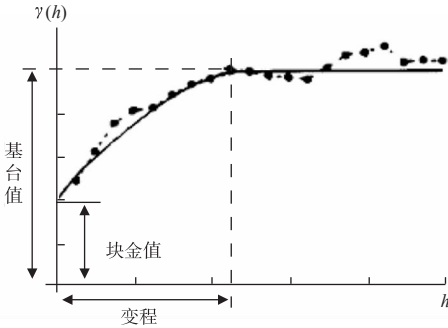


图 1 实验变差函数的拟合

1.2 常见的几种克里金方法

克里金方法是在二阶平稳假设和本征假设的基础上,应用变差函数(或协方差)研究空间上随机且相关的变量分布的方法。克里金估计值是根据待估计点周围的若干已知信息,以变差函数为工具,确定估计点周围已知点的参数对待估计点的加权值的大小,然后对待估计点作出最优(即估计方差最小)、无偏(即估计方差的数学期望为 0)的估计<sup>[5]</sup>。

1.2.1 用于单变量的常用克里金方法

1) 简单克里金(Simple Kriging, SK)。

当随机变量  $X(u)$  的数学期望对所有的  $u$  都为已知时,采用的克里金方法就是简单克里金方法。简单克里金的估计值为

$$X^*(u_0) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i X(u_i) \quad (2)$$

式中: $X^*(u_0)$ 是位于  $u_0$  的估计值; $X(u_i)$ 为待估点周围的采样点值; $\lambda_i$ 为加权系数。若要求出  $\lambda_i$  的值,需要使用最小方差无偏条件

$$E[X(u_0) - X^*(u_0)] = 0$$

和一阶平稳假设

$$E[X(u_i)] = E[X(u_0)] = m$$

根据最小方差条件使

$$\sigma_E^2 = \text{Var}[X(u_0) - X^*(u_0)] \quad (3)$$

最小化,得到 SK 方程和估计方差

$$\text{SK 方程} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_j \gamma(u_i, u_j) = \gamma(u_j, u_0) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\text{SK 估计方差} \quad \sigma_E^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(u_i, u_0) \quad (5)$$

其中  $\gamma$  为变差函数。

2) 普通克里金(Common Kriging, CK)。

在进行简单克里金估计时,我们假设整个区域的均值是已知的。但实际上这个整体均值很难知道,除非令采样点的均值来代表整体的均值。储层物性的均值是随着局部区域的不同而变化的,上述假设在绝大部分情况下是不成立的。普通克里金解决了这一问题。在式(2)中,令  $\lambda_0=0$ ,得到

$$X^*(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i X(u_i)$$

由简单克里金的推导得到

$$\text{CK 方程} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_j \gamma(u_i, u_j) + \mu = \gamma(u_j, u_0) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\text{CK 估计方差} \quad \sigma_E^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(u_i, u_0) + \mu \quad (7)$$

1.2.2 用于双变量的克里金方法

以协克里金(Co-Kriging, COK)方法为例。协克里金方法利用几个变量之间的空间相关性,对其中的 1 个或几个变量进行空间估计,可以提高估计的精度。下面讨论 1 个主变量和 1 个二级变量的线性组合形式。

$$X^*(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{X_i} X(u_{X_i}) + \sum_{k=1}^m \lambda_{Y_k} Y(u_{Y_k}) \quad (8)$$

式中: $X^*(u_0)$ 是  $u_0$  位置的估计值; $X(u_{X_i})$ 是在位置  $u_{X_i}$  上的主变量采样值; $\lambda_{X_i}$ 是其相应的加权系数值; $Y(u_{Y_k})$ 是位置  $u_{Y_k}$  上的二级采样值; $\lambda_{Y_k}$ 是其相应的加权系数值。同简单克里金的推导,利用无偏和方差最小的条件,可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_{X_j} C_X(u_{X_i}, u_{X_j}) + \sum_{k=1}^m \lambda_{Y_k} C_C(u_{Y_k}, u_{X_i}) + \mu_X = C_X(u_0, u_{X_i}) \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{X_i} C_C(u_{X_i}, u_{Y_k}) + \sum_{l=1}^m \lambda_{Y_l} C_Y(u_{Y_k}, u_{Y_l}) + \mu_Y = C_Y(u_0, u_{Y_k}) \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{X_i} = 1 \\ \sum_{k=1}^m \lambda_{Y_k} = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

式中: $C$ 表示协方差。

估计方差为

$$\sigma_E^2 = C(u_0, u_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_{X_i} C_X(u_0, u_{X_i}) -$$

$$\sum_{k=1}^m \lambda_{Y_k} C_C(u_0, u_{Y_k}) - \mu_X - \mu_Y \quad (10)$$

## 2 地质统计学方法的应用

### 2.1 储层预测

对储层参数进行科学有效的预测,一直是石油地质学的热点和难点。最初采用传统的数理统计方法,但这种纯数学的方法不考虑储层参数之间的空间连续性和相关性,不带任何地质意义,对储层参数预测具有很大的局限性。而地质统计学方法以区域化变量理论为基础,充分考虑了地质参数空间变化的趋势、方向性及2样点参数的相互依赖性,利用克里金方法的插值和外推功能,求出比较符合地质规律的地质统计模型和方法,来表征各种储层参数的变化规律,然后用这种规律,对参数(如孔隙度和渗透率等)的空间展布进行比较合理而有效的预测。地质统计学的应用实现了纯数学方法预测→地质认识+数学方法预测的飞跃<sup>[6]</sup>。

### 2.2 储层的非均质性及各向异性研究

储集层非均质性研究是油藏描述的重要内容,其参数的空间分布不仅具有随机性,而且具有结构性。从地质统计学关于变差函数的基本理论出发,在综合分析的基础上,构造了一种定量表征储集层平面非均质性的数学模型,计算结果所反映的各类储集层的平面非均质特征符合沉积的基本规律,说明这一表征模型用于储集层平面非均质性定量评价中是可行的<sup>[7,8]</sup>。通过与变差系数计算值的对比,说明该方法优于传统的数理统计方法。下面以球状模型模拟变差函数为例加以分析。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C & h > a \\ C_0 + C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 < h < a \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C_0$ 为块金常数; $C_0 + C$ 为基台值; $C$ 为拱高; $a$ 为变程。

由变差函数性质建立变量非均质性表征模型<sup>[8]</sup>

$$Q = \frac{1}{2} \left( \frac{C_0 / (C_0 + C)}{a/l} + \frac{\sigma}{\gamma} \right) \quad (12)$$

式中: $Q$ 为区域化变量非均质性表征系数(无量纲),表示理论变差函数特征值和实验变差函数点自身波动程度所反映的区域化变量非均质性的综合效应; $l$ 为储集层尺度常数,根据储集层宏观非

均质性描述特点,结合工作实践,取 $l = 1 \text{ km}$ ;  $\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma$  ( $n$ 为变程内实验变差函数值的个数);  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} [\gamma(i+1) - \gamma(i)]^2}$ , 其中  $\gamma(i) = \gamma(h_i) / \max(\gamma(h_i))$ ,  $\gamma(h_i)$ 为各滞后距所对应的实验变差函数值。式(12)对实验变差函数值进行归一化处理,旨在考虑实验变差函数点波动程度时,消除不同区域化变量因数量级不同而造成的影响,使该表征模型可对不同区域化变量的非均质性进行定量对比<sup>[8]</sup>。非均质性表征模型具有以下意义: $Q$ 体现了区域化变量随机性和结构性变化的相对程度, $C_0 / (C_0 + C)$ 越大,表明非均质性越强;反映出区域化变量的空间变化速度, $a$ 值越大,非均质性越弱;考虑了实验变差函数点的自身波动程度, $\sigma / \bar{\gamma}$ 越大,非均质性越强。综合以上特征, $Q$ 值越大,非均质性越强,反之越弱。

以大庆油田北二东密井网区具有代表性的SII<sub>8</sub>, SII<sub>2</sub>和PI<sub>4</sub>3个单砂层的砂体厚度作为计算的区域化变量。其中SII<sub>8</sub>层代表大中型河道砂体沉积组合类型,其特点是河道砂在平面上连片分布,由相对宽而深的曲流河侧向侵蚀和加积而形成,复合曲流带处砂体宽度可达1~2 km,砂体厚度多为3~6 m,仅局部井点发育河间沉积,总体上,砂体厚度相对稳定,SII<sub>2</sub>层代表小型河道砂体沉积组合类型,河道砂体由充填式的垂向加积作用而形成,基本上以单一的河道砂体形式存在,砂体宽度200~500 m,砂体厚度2~5.5 m,河道砂和河间砂相间分布,平面上砂体厚度变化较大;PI<sub>4</sub>层代表席状砂体类型,以发育比较稳定的水下席状砂为主要特征,砂体尖灭区很少,平面上厚度变化小,为1~2 m。由于以上储集层的沉积均来自近北部物源,加之井网系统比较规则,因此,选择垂利物源(东西向)和平利物源(南北向)2个方向计算了实验变差函数值和非均质性表征值(表1),并对实验变差函数曲线及球状理论模型进行了拟合(图2)。

由表1可知,SII<sub>2</sub>层小型河道砂体组合而言,垂利物源方向(东西向)的砂体厚度非均质程度大于平行物源(南北向)的非均质程度。而对于SII<sub>8</sub>层大中型河道砂体组合而言,垂利物源方向砂体厚度的非均质程度弱于平行物源方向的非均质程度。

用地质统计学方法研究各向异性同样是基于变差函数的。在计算变差函数时,公式(1)其实计算的是全向变差函数,也就是在不考虑各向异性的

表 1 3 个单砂层的球状理论变差函数曲线特征值及其非均质体表征值

小层	方向	块金常数 $C_0$	拱高 $C$	变程 $a/m$	表征系数 $Q$	$\bar{Q}$	变异系数
SII <sub>8</sub>	东西向	0.776	1.357	954	0.260	0.396	0.407
	南北向	0.929	0.787	684	0.532		0.432
SII <sub>2</sub>	东西向	1.201	1.609	492	0.631	0.529	0.768
	南北向	1.267	1.015	862	0.427		0.717
PI <sub>4</sub>	东西向	0.045	0.109	919	0.265	0.259	0.269
	南北向	0.033	0.033	686	0.252		0.247

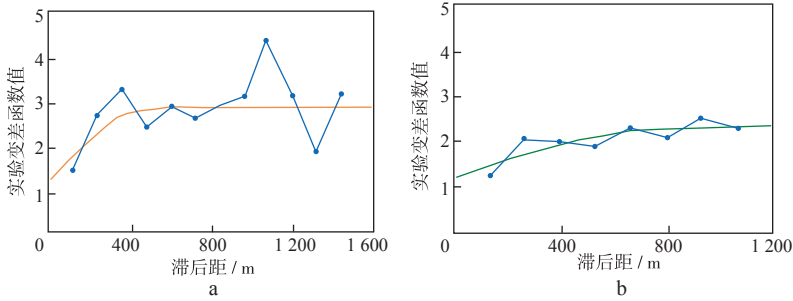


图 2 SII<sub>2</sub> 层实验变差函数拟合  
a 东西向; b 南北向

前提下计算出来的。在本征假设的基础上,沿不同的方向计算变差函数,如果计算结果不同,则说明介质存在各向异性。目前用变差函数的方法解决各向异性的方法仅限于将不同方向计算出的结果进行“叠加”,也就是所谓的套合,主要分为几何各向异性、带状各向异性和结构的套合<sup>[4]</sup>。

### 2.3 数据整合

地质统计学为系统地匹配使用好各种资料信息提供了许多方法。

#### 2.3.1 协克里金整合法

从上述介绍协克里金方法可以看出,该方法可以整合 2 种不同的数据,但有局限性:首先,克里金估计是一种局部估计方法,对数据整体空间相关性考虑不够;其次,克里金估计具有平滑效应,减小了真实数据原本可能具有的分散性和变化性;再次,克里金法是一种确定性建模,整合地震数据之后得到唯一的储层模型,这样就不能对储层的不确定性做出评价,不能对结果做出优选,只能认为最终结果是最佳的和唯一的。所以提出了用随机模拟方法整合数据<sup>[9,10]</sup>。

#### 2.3.2 随机模拟整合数据

随机建模的基本思路是从一个随机的储层参数  $Z(u)$  中抽取多个可能的实现,即人工合成反映  $Z(u)$  空间分布的可供选择的、等概率的、高分辨率的实现<sup>[9,11]</sup>。随机模拟按照基本模拟单元可分为

2 类:基于目标的随机模拟和基于像元的随机模拟。后者又包括序贯高斯模拟、截断高斯模拟、分形模拟法和马尔可夫域模拟法。

### 2.4 克里金算法结合其他技术在储层建模中的应用

#### 2.4.1 克里金算法结合地震反演进行储层建模

在这种储层建模中用到的克里金技术是用于数据的外推和内插功能。采用克里金算法进行井间预测,预测精度较高。地质统计学地震反演是一种基于模型的地震反演,其思路如图 3 所示。这种方法有 2 个特点:①优选迭代,即在初始地质模型的基础上,通过优选迭代不断修改更新模型,使模型正演合成地震数据与实际地震数据最佳吻合,最终的模型数据便是反演结果,它以测井资料丰富的高频信息和完整的低频成分补充了地震有限带宽的不足;②直接反演成储层属性,选择测井曲线并转换为声阻抗曲线,给定地震子波,生成合成地震

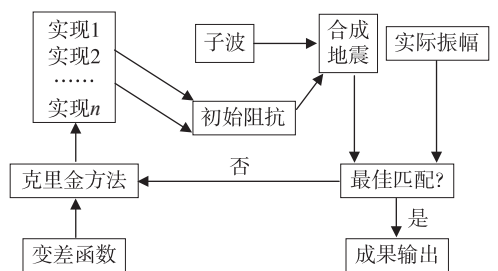


图 3 地质统计反演流程

记录,由井点向外延伸,将地震道直接反演成储层属性,这样避免了将波阻抗转换为储层属性所造成的误差。地质统计学克里金方法在这里有 2 点应用,体现在:①建立初始模型用于约束地震反演;②结合地震反演结果综合地质建模<sup>[12,13]</sup>。地质统计学空间插值技术严格遵循井点储层变化规律,因而能够准确描述储层垂向分布特点。

从图 4、图 5 和图 6 可以看出,基于井数据得到的模型纵向分辨率高,但横向连续性差。地震反演模型纵向分辨率不高,但横向连续性较高。井数据联合地震反演得到的最终模型则从纵向分辨率横向连续性上均有提高。

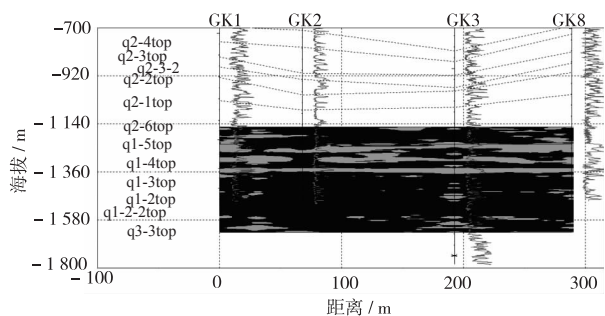


图 4 基于井数据的初始模型

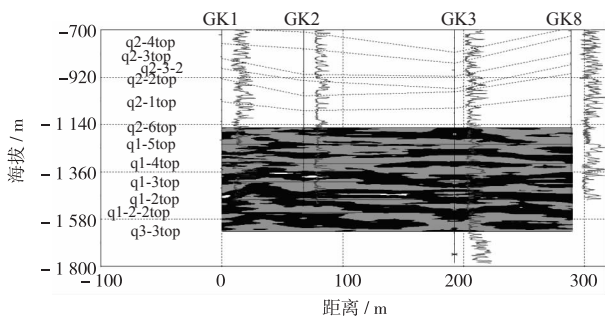


图 5 地震反演模型

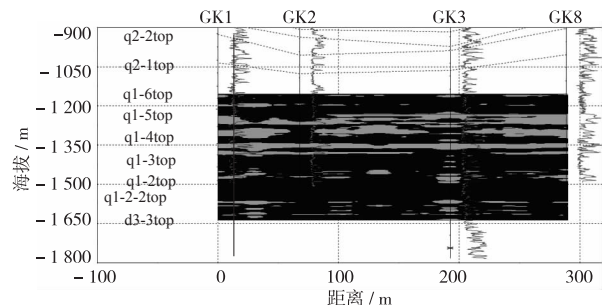


图 6 井数据联合地震反演结果得到的模型

### 2.4.2 地质统计学随机模拟建模

随机建模就是以现有数据和信息为条件,人工合成多个反映现有参数数据分布或该参数理论分布的模型。这多个模型是在现有数据条件下对储

层参数合理的反映。目前出现的随机模拟方法很多,衡量一种随机建模方法好坏的标准是:①能够综合各种类型和精度的资料,尽可能地减少模型中的随机性成分;②能够预测模型中预测值的不确定性;③忠实现有数据的空间分布规律,如变异函数的分布、协方差函数的分布等等;④能够反映储层的非均质性,如渗透率奇异值的分布<sup>[13]</sup>。1989 年 Journel 和 Alabert 提出一种新的绘图方法即序贯指示建模方法,理论研究表明这种方法能满足上述几个要求。

序贯指示建模方法是以指示变换和指示克里金为基础的,所谓指示变换就是将原始数据按照不同的阈值,编码成 0 或 1 的过程。假设在  $X$  处的参数  $Z(x)$ ,对阈值为  $Z_c$  的指示变换可写成

$$I(Z_c, Z) = \begin{cases} 1 & (Z \leq Z_c) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (19)$$

如果引入指示变换,上式可以写成

$$F(Z, Z_c) = P(Z \leq Z_c) \\ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(Z_c, Z) \in [0, 1] \quad (20)$$

指示克里金法又称为概率克里金法,与其他克里金方法不同之处在于,它不是用来预测某个具体值,而是作指示预测。式(20)是一种等权指示加权法,对未知数预测,通常也用不等权加权法

$$F(z, x) = [I(z, x)]^* = \sum_{j=1}^n a_j(z, x) \cdot I(z, z_j) \quad (21)$$

式中: $[I(z, x)]^*$  为预测量; $a_j(z, x)$  为权系数可由下式求得

$$\sum_{i=1}^n a_i(z, x) \cdot C_I(z, x_i - x_j) + \mu(z, x) \\ = C_I(z, z_j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i(z, x) = 1 \quad (23)$$

序贯指示模拟法中的一个很重要的问题就是如何忠实于已知数据和信息的空间连通模式,从而使所建的模型反映参数的非均质性。具体的模拟步骤为:①对变量进行指示变换,包括可能的各种信息,确定  $K$  个阈值  $Z_k$ ;②推断指示协方差或变异函数、连通函数;③设定通过要模拟的  $N$  格点的随机途径;④在每一个格点  $X$ ,进行  $K$  指示克里格计算来确定该处的后验累积分布函数;⑤从后验累积分布函数上拾取模拟值  $Z_i(x) (i=1, 2, \dots)$ ,并把模拟得出的值加到已知信息中去,使原来的信息容量  $n$  变为  $n+1$ ;⑥回到步骤③,直到每个待模拟



的节点都走到为止。实例参见文献[14]和文献[15]。用序贯指示方法不仅能克服传统插值方法对变化较大的参数的光滑效应,而且能够建立反映由于资料不足而造成的模型中的不确定性。序贯指示模拟方法的另一个优点是它能够在建模中考虑参数奇异值的空间分布模式。研究表明,用序贯指示模拟方法所建的模型更能反映储层的非均质性,同时还能能为油藏工程师提供多种可选的储层地质模型,为开发决策服务。

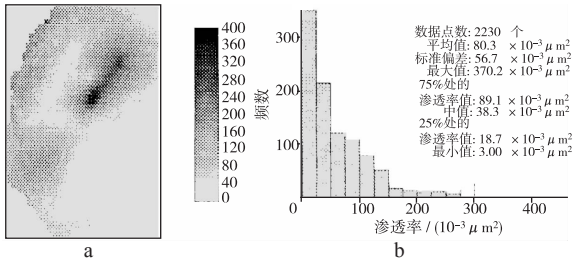


图 7 用传统的克里金方法所作的预测

a 普通克里金方法所预测的渗透率分布;

b 普通克里金预测值直方图

比较图 6 与图 7 可以看出,序贯指示模拟方法所建的模型不但能反映储层的非均质性,而且还能反映由于资料的缺少而导致的模型的不确定性。

## 2.5 不确定性描述

静态、动态的确定性模型,很难反映油藏的复杂变化,只有通过不确定性描述,从地质统计观点概括和综合地质模型,才能真实地反映复杂的油藏模型<sup>[16]</sup>。近几年来,地质统计学越来越广泛地用于储层表征,诸如估计孔隙度的空间分布,模拟渗透率的数值连续性,定量估计油藏模型的不确定性,取样设计,流动模拟过程中的敏感性分析和风险分析等等。它的最大优点就在于能够方便地综合应用各种资料,如地质、地震、测井、生产等方面的信息,这对岩心取样十分稀疏的油藏的准确描述是关键。而且不确定性描述为油藏工程师提供多个可选择的开发方案,有利于综合分析,获得合理的开发决策。如图 8,渗透率数据的 4 种不同实现可以展示出不同的储层地质模型,可以提供最优、最差、折中的方案。

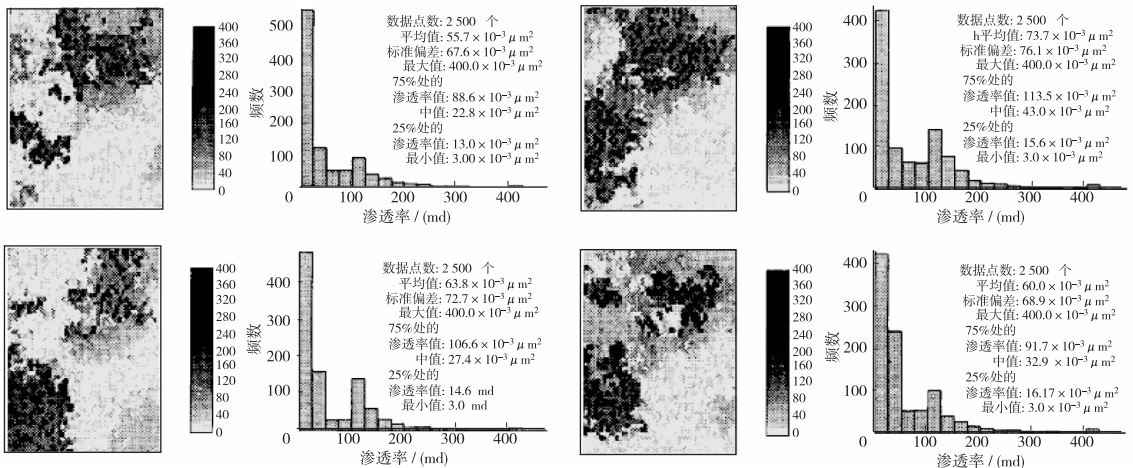


图 8 同样渗透率数据的 4 个不同的实现和对应的直方图

## 3 地质统计学方法的局限性

地质统计学虽然能够定量地反映与油藏有关的各种岩石物性参数的空间分布特征,并且通过产生许多不同的等概率的油藏模型,定量地表征由于资料的缺乏所引起的储层表征的不确定性,但作为一门新的学科,它还存在着许多局限和不足。

1) 所产生的油藏模型的好坏强烈地依赖于所假设的随机函数的模型及已有数据,在数据很少的情况下,很难验证所假设的模型是否与实际地质条件相符合<sup>[16]</sup>。

2) 变差函数的模拟带有许多主观性,且涉及多变量的交叉变差函数的模拟受到线性区域化模型的限制。地质统计学方法强烈依赖于变差函数,如果变差函数的计算及模拟出现问题,则用地质统计学方法与其他方法相比不存在优势。

3) 各种地质信息数据综合应用还有待于进一步的发展、完善及验证。

4) 随机模拟所产生的各种数值模型用于油藏工程的流体流动模拟还有一个不同规模的转换过程,无法直接用于流动模拟装置。

5) 随机模拟可产生多个等概率的油藏数值模型,如何挑选最合适的模型进行流动模拟,需要一

个准则,这也是目前尚待解决的问题<sup>[17]</sup>。

## 4 地质统计学方法的发展方向

现代地质统计学理论体系的不断完善与应用水平的不断提高促进了相关学科的发展。现代地质统计学要想在未来的应用中发挥更大的作用,应向以下几方面发展。

1) 加强理论研究。继续完善现有的理论体系,加强多元地质统计学技术和多元动态条件模拟的研究。各种地质统计学方法相互渗透,并与其他学科交叉合作。

2) 在数据整合方面起到更大的作用。如在试井中进行多尺度数据整合;整合动态模型数据(相对渗透率,毛管压力等)和静态模型数据(孔隙度、渗透率等)。

3) 拓宽应用领域。例如如何将地质统计学运用到地质研究的全过程,从勘探到开发及风险评价。如何由油藏工程师将其应用到油藏工程以提高采收率的问题等等。

4) 充分发挥地质统计学软件包功能。各种地质统计学软件包是进行地质统计学研究及实际应用的强有力工具,使非地质统计学方向的学者同样可以应用地质统计学。

总之,作为一门新兴的学科和描述地质参数空间分布特征的工具,地质统计学发挥出日益重要的作用,同时它在实际应用中的局限性也逐渐地被认识并在应用过程中得以完善。

### 参 考 文 献

- 1 Chambers R, Yarus J M, Hird K B. Petroleum geostatistics for nongeostatisticians Part 1 [J]. The Leading Edge, 2000, 19(5): 474~479
- 2 Chambers R L, Yarus J M, Hird K B. Petroleum geostatistics for nongeostatisticians Part 2 [J]. The Leading Edge, 2000, 19(6): 592~596
- 3 肖斌,赵鹏大,侯景儒. 地质统计学新进展[J]. 地球科

学进展, 2000, 15(3): 293~296

- 4 侯景儒,尹镇南编著. 实用地质统计学[M]. 北京:地质出版社, 1998. 1~39
- 5 王家华,高海余,周叶编著. 克里金地质绘图技术——计算机的模拟和算法[M]. 北京:地质出版社, 1999. 45~86
- 6 王泽华,李庆. 地质统计学方法在储层预测中的应用——以莫北油气田莫北9井区为例[J]. 新疆石油学院学报, 2001, 13(1): 26~30
- 7 何琰,殷军. 储层非均质性描述的地质统计学方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3): 13~17
- 8 毕研斌,麻成斗,石红萍等. 变差函数在描述储集层平面非均质性中的应用[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(3): 251~255
- 9 印兴耀,刘永社. 储层建模中地质统计学整合地震数据的方法及研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 423~430
- 10 Caers J, Avseth P, Mukerji T. Geostatistical integration of rock physics, seismic amplitudes, and geologic models in North Sea turbidite systems[J]. The Leading Edge, 2001, 20(3): 308~310
- 11 Lee W B, Xu Wenlong. 3-D geostatistical velocity modeling Salt imaging in a geopressured environment [J]. The Leading Edge, 2000, 19(1): 32~36
- 12 邱立伟,杨安平,龙胜祥等. 孤家子一后五家户气田地地震反演与储层建模综合研究[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(1): 50~52
- 13 黄花香,曾涛,唐必锐等. 地质统计分析方法在鲕滩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2003, 43(3): 275~277
- 14 纪发华,熊琦华. 序贯指示建模方法在枣南油田储层非均质研究中的应用[J]. 石油学报, 1994, 15(增刊): 179~187
- 15 年静波,汤磊,刘喜武. 地质统计分析在地震资料砂泥岩分布预测中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 278~282
- 16 熊琦华,纪发华. 地质统计学在油藏描述中地应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(1): 115~120
- 17 熊琦华,陈亮,聂昌源等. 地质统计学在储层表征中的应用[J]. 断块油气田, 1997, 4(1): 21~29