

辫状河储层建模方法研究

伍 涛 杨 勇 王德发

摘 要 辫状河储层在我国陆相盆地中广泛分布,而对这类储层的认识却较差。辫状河砂体的非均质性严重,这是影响开发效果的重要原因。本文以张家口地区的露头砂体为例,在密集取样的基础上建立了砂体的地质模型,分析了砂体的非均质性特征,探讨了辫状河储层的建模方法。根据孔隙度和渗透率的变差函数分别建立了孔隙度和渗透率的克里金模型和条件模拟模型;利用频谱分析法和变尺度分析法对渗透率进行了赫斯特指数的求取,得到该砂体的赫斯特指数的平均值在0.8左右,同时利用分形几何的插值理论建立了渗透率的分形几何模型。对各种模型进行的比较显示克里金模型较好地表现了物性参数的整体趋势;条件模拟模型较好地再现了储层非均质性;而分形几何模型既反映了储层宏观物性分布,又反映了其内部非均质性变化。整体上看,分形几何模型是一种相对比较好的模型,可应用于油田开发早期。

关键词 辫状河砂体 储层非均质性 克里金模型 条件模拟 分形几何模型

中图分类号 P618.130.21 文献标识码 A

Methods of Reservoir Modeling on Braided River Sandstones

WU Tao¹ YANG Yong² WANG De-fa¹

1(China University of Geosciences,Beijing 100083)

2(Institute of Exploration & Development,CNSPC,Beijing 100083)

Abstract

Braided river sandstones are widely distributed in Chinese continental basins; however, development for these reservoirs is not very satisfactory. The most important reason is the heavy heterogeneity of braided sandstones. This paper takes the outcrop in the Zhangjiakou region, Hebei province as an example, which was densely sampled. Geological models are established based on the heterogeneity analysis of the sandstone, and then methods of modeling are probed. Kriging models and conditional simulation models are built based on porosity and permeability variogram. Hurst indexes are calculated based on spectral analysis and rescaling analysis, which vary at the level of 0.8. One fractional permeability model is built based on fractional geometry interpolation principles. The results suggest that Kriging models could reflect the macroscopic change of reservoir physical properties, conditional simulation models could reveal the reservoir heterogeneity, and the fractional model could reveal both the macroscopic physical properties and microscopic heterogeneity.

Comparison of these models show that the fractional model is relatively the most effective

Key words braided river sandstones heterogeneity Kriging model conditional simulation fractional mode

当前,在储层建模和模拟研究中,露头研究日益受到人们的重视,原因之一是露头研究所获得的模型可用于井间预测。其基本思路是在野外露头上进行密集取样,实测孔、渗等物性参数,把所研究的某种沉积体系砂体内部物性变化的原型揭示出来,然后用各种地质统计方法来模拟它,抽稀控制点,用某种数理统计方法把控制点间的参数模拟与实际逼近,然后应用于地下地质的实际工作之中。

本文所研究的辫状河砂体位于张家口地区,层位上属侏罗系,长430 m,厚3.4~6.7 m,为砂质辫状河,缺乏泥质夹层,共布置测线19条,测线间的平均间隔为24 m。在已建立的储层地质模型基础上对储层的计算机模拟进行了探讨,以寻求适应辫状河储层建模的最佳方法。

1 储层建模方法各论

储层研究所要解决的主要问题是储层的非均质性即各向异性问题。过去人们采用传统的数理统计方法,如反距离平方加权法和趋势面叠加法等确定性方法。由于空间分布的物性参数既具有结构性又具有随机性,这种双重性决定了不能用通常的数学分析方法对这种物性参数进行直接研究,而必须用随机函数来刻画,即采用地质统计学方法。地质统计学是近30年来发展起来的一门新兴边缘学科,是各种地质参数空间估值分布处理的极好手段,它一般包括四个方面的内容:区域化变量、变差函数、克里金估值和条件模拟^[1]。参数预测的最新进展之一是将分形几何理论运用到地质领域来,国外对此项技术进行了比较深入的研究,并取得了相当好的效果。

1.1 克里金法

克里金法是地质统计学的核心,它以变差函数为基本工具,研究区域化变量的空间分布规律。

根据采样结果,作出孔隙度在水平方向和垂直方向的变差函数图(图1)。由图1可知,水平方向上变程为92.991 m,垂直方向上变程为2.4 m左右,这说明垂直方向的变异程度远大于水平方向的变异程度,而这恰好反映了辫状河的沉积特征。辫状河以河道宽而浅为特征,在一个河道断面上可以出现多个心滩坝,一个时间单元砂体的几何形态反映了古河流规模。心滩坝的基本沉积方式是垂向加积,层内垂向上粒序变化反映各次洪泛事件能量大小的波动及其所携带碎屑物的粗细。因此通常呈现“无规则”的粒序,不存在曲流河砂体那样的“向上变细”的粒序^[2],正是由于辫状河的这种沉积特征,造成了储层物性在垂向上的变化较之在水平方向的变化要剧烈得多。

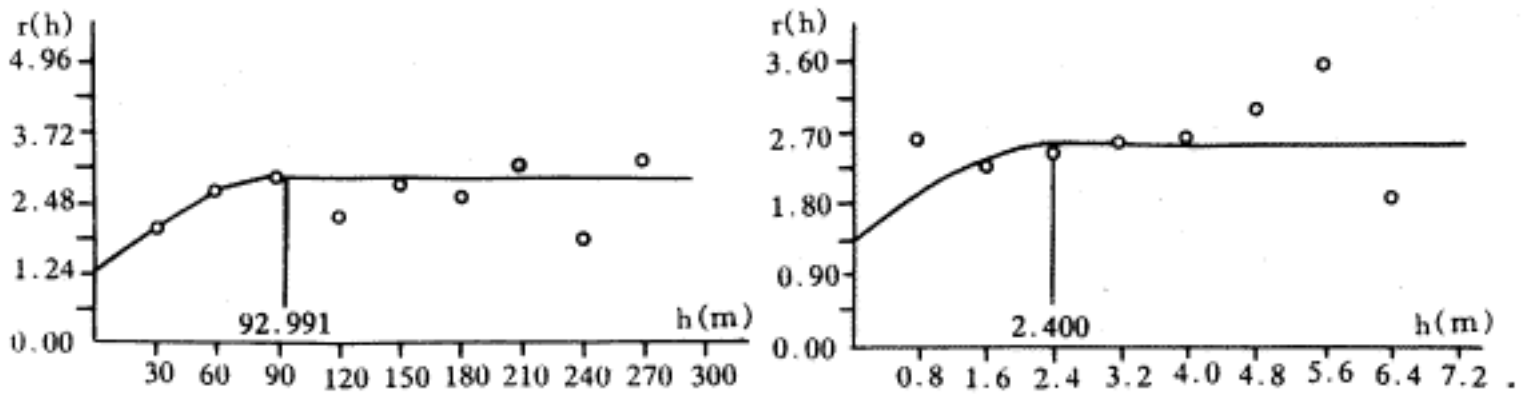


图1 孔隙度变差函数图(a.水平方向 b.垂直方向)
 Fig.1 Porosity variogram(a.horizontal,b.vertical)

而后对测线进行抽稀得到的变差函数也表明了这一特点。第一次抽稀后，测线间的平均间隔为48 m，为没抽稀时的两倍。孔隙度在水平方向的变程为118.71 m，比没抽稀时大，垂向上无变化，仍为2.4 m，这可能与垂向上数据点多有一定联系。第二次抽稀后，测线的平均间距为65 m，孔隙度在水平方向的变程为150.0 m，而垂向上仍为2.4 m。第三次抽稀后，测线的平均间距为120 m，由于信息点较少，孔隙度在水平方向的变程达到198.64 m，已超过取样范围的一半，此时变差函数图的估计是不可靠的。由于渗透率服从对数正态分布，故先对渗透率取对数，再作出并拟合其变差函数图，它同样反映了这一规律。

由变差函数进行最优性检验，求得了采样点的估计方差，交叉验证值没抽稀和第一次抽稀时都约为0.8，第二次抽稀为1.1，第三次抽稀为2.5。可见随着信息点的减少，变差函数的拟合点越来越少，拟合精度越来越低，这势必影响克里金估值的准确性。

根据求得的变差函数，利用泛克里金法，分别做出了几种不同情况下的孔隙度和渗透率剖面图(图2~5)。从图上可看出，克里金较好地再现了储层物性的整体变化，孔隙度和渗透率的高值区对应粗粒分布区。从估计的孔隙度图中可以看出在抽稀至间隔五十米以上时，储层的性质已有所扭曲，不能反映其真实特征。渗透率由于变化更快，间隔不到五十米就已扭曲。由此可知，克里金法的关键在于准确地确定变差函数，大量具有正态分布或对数正态分布的信息点可以提高求变差函数的精度，这是其能否应用的前提条件，同时也是制约其广泛应用的障碍之一。

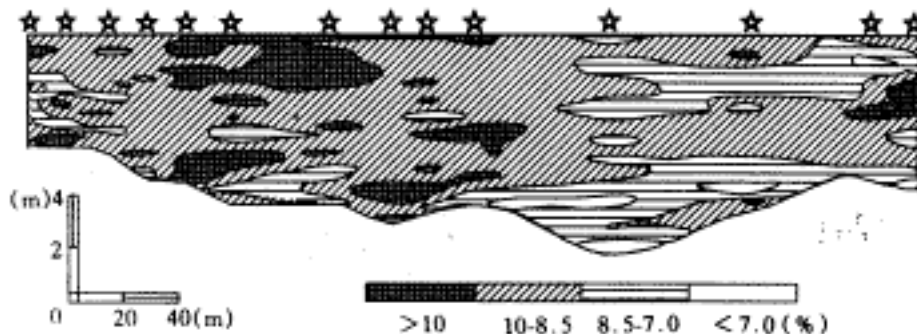


图2 孔隙度克里金剖面图(L6—L19测线)

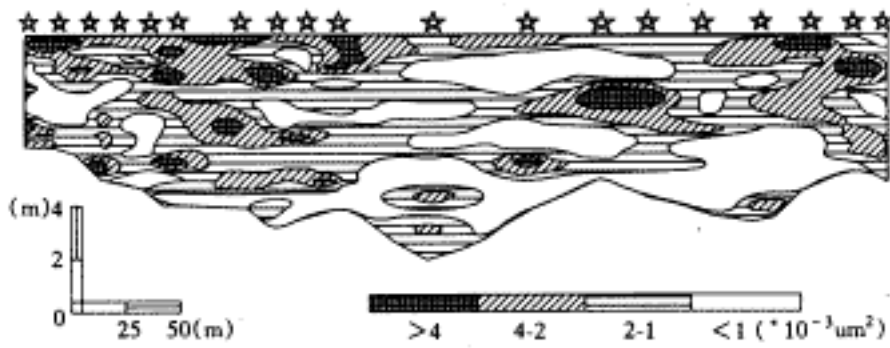


图3 渗透率克里金剖面图(L1—L19测线)
Fig.3 Kriged permeability profile (L1—L19)

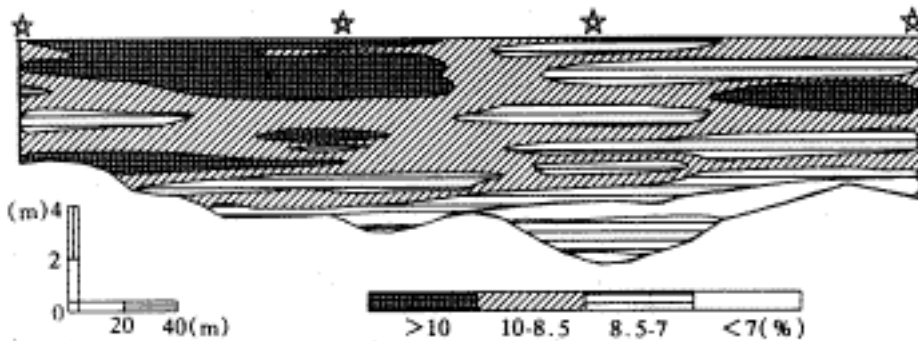


图4 第三次抽稀孔隙度克里金剖面图(L6—L19测线)
Fig.4 Kriged porosity profile with lines extracted(L6—L19)

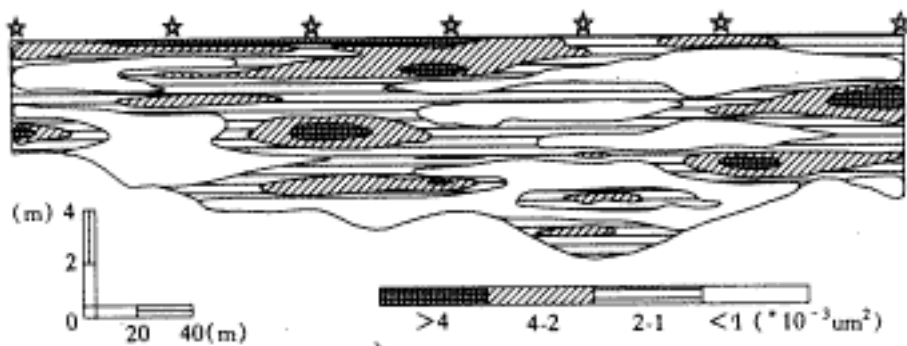


图5 抽稀后渗透率克里金剖面图(L6—L19测线)
Fig.5 Kriged permeability profile with lines extracted(L6—L19)

1.2 条件模拟法

模拟是用数学或物理的各种模型再现地质过程的一种有效的试验方法〔3〕。随机

模拟通常分为条件模拟和非条件模拟，非条件模拟只要求再现地质特征的空间相关

常见的随机模拟方法很多，如蒙特卡罗法、转带法、示性点过程法等。

为了实现条件模拟，我们通过随机数发生器，应用蒙特卡罗法，产生一系列不同的非条件模拟值，然后通过克里金估值，得到一次条件模拟的实现。每次实现是随机不同的，但受相同的数据和方差图的约束，复合这些实现可以预测地下不确定情况。例如，渗透率条件模拟可能产生空间连续性相对差的实现，也可产生空间连续性相对好的实现，条件模拟可以产生几百种不同的测线(井)间非均质性的随机解释，这些随机解释为油田开发提供了估计储层最差和最好的几种可能性。图6是原始剖面的一次实现，由图6可看出，条件模拟极好地再现了储层非均质性，它与克里金剖面之间的主要区别就是其存在着孤立的、测线(井)间渗透率或高或低的指状砂。图7为两百次实现的模拟值的平均，它与图3有很好的相似性。这是因为条件模拟在实际点处的模拟值等于实现值，而在其它点处产生的随机值经平滑后就变成经过实际点间光滑的曲线，而克里金法正好有圆滑修匀的特性。分形得到了广泛的应用〔4〕。

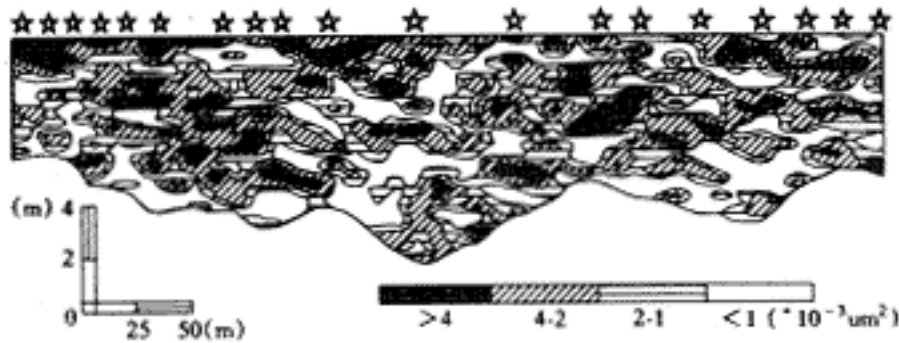


图6 渗透率条件模拟剖面图(L1—L19 测线)

Fig.6 Conditionally simulated permeability profile (L1—L19)

条件模拟是建立在变差函数基础上的，因此变差函数确定的好坏直接关系到条件模拟与地质解释的符合程度。

1.3 分形几何法

分形几何是一门几何学，它研究的对象是欧式空间的一类子集。如果说欧式几何是研究规则图形的几何学，那么分形几何学则是研究不规则图形的几何学。自从Mandlebrot最早引入分形概念以来，

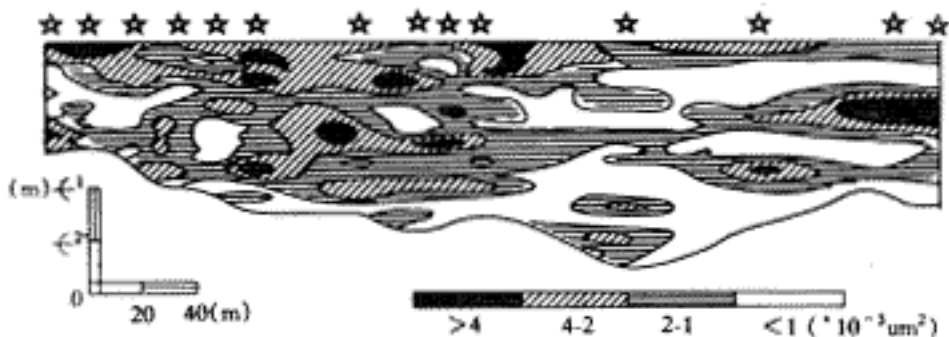


Fig.7 Conditionally simulated permeability profile of realization (after 200 times simulation)(L6—L19)

在D维欧式空间中，特征线度为 r_n 的物体(fragments,也称为碎片)的数目 N_n 可表示为：

$$N_n = C/r_n^D$$

C是比例常数，D称为分维数。分维数可能为整数，这时它与欧式空间的维数是等价的。但一般来说，分维数不一定是整数，而是个分数，这就是分维数一词的由来。

获取分维数的关键在于获得赫斯特指数(H)，它与分维数的关系为：

$$H=2-D$$

赫斯特指数反映分形体变化的剧烈程度，引用到渗透率分布的研究中，则可反映渗透率空间变化不均一性的剧烈程度。

我们用频谱分析法和变尺度分析法分别求取了各测线的赫斯特指数，前者得到的赫斯特指数平均为0.755，后者为0.89，这种偏差可能与选用的方法有关，但砂体的赫斯特指数稳定在0.8左右，这与自然界里地质数据赫斯特指数分布范围相符。在求取了储层参数的赫斯特指数后，可以采用随机分形插值方法，插出测线(井)间储层的参数值。分形建模的关键是选用随机分形插值方法，常用的有中点位移法、序贯随机附加法和傅利叶变换法等，本文选用序贯随机附加法，得到渗透率的剖面实现，可从中挑选出符合地质解释的剖面实现。图8为其中一幅，和图3相比，它不仅反映了储层物性的整体变化规律，而且较好地再现了储层非均质性。

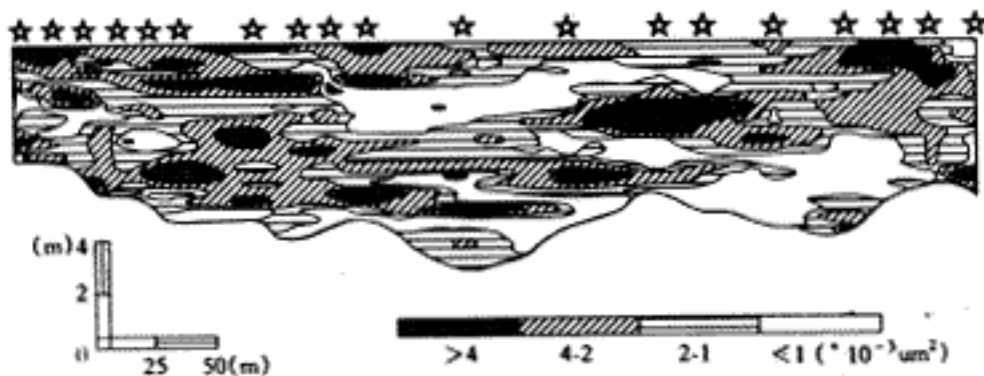


图8 渗透率分形插值剖面图(L1—L19 测线)

2 各种建模方法比较

1)地质统计学中的克里金估值理论是一种线性无偏、最优化估值方法,它是利用观测数据平滑出未知点的估算,这种估值的结果反映的是大范围的趋势,小尺度的变异性被平滑掉了。然而为了研究储层非均持性,就必须考察小尺度的变异性。因此,为了再现储层非均质相关结构,应让位于条件模拟和分形几何替代克里金估值法。

2)条件模型产生的随机图象除了再现随机模型所要求的反映储层属性在空间的分布特点外,还要求与已知点数据相一致,并在整体上对未抽样的位置提供一种不确定的度量,而不是局部的一个位置接一个位置地反映这种不确定性。但基于变异函数的蒙特卡罗条件模拟需要较多比例相当、符合随机采样原则的样品点,并且需大量的准确调试,占机时多,工作量较大。

3)分形技术引入非光滑的随机插值,从总体上反映了储层参数的非均质特征。分形技术建立的储层模型既能反映储层宏观变化趋势,又能反映其内部非均质性变化。当然,分形预测所追求的是给出的储层参数的非均质结构与真实情况的逼近,而不是逐点上数据相等。它没有条件模拟那样严格的样品要求,尽管也具有一定的工作量和实测点存在估计误差,但分形几何在技术上相对来说是先进的,在应用效果上是较佳的。

3 结束语

“只有最大限度地贴近地质的真实,而不仅仅是数学的真实,才能实现正确的模拟”〔4〕。我们在建模过程中应始终贯穿这一指导思想,模拟的目的是为了应用,因此,它必须符合或接近实际。辫状河砂体具有成因河道短、快速迁移、垂向加积等特点,它没有曲流河砂体那样典型的“正韵律”,也没有三角洲砂体那样典型的“反韵律”,因此显示出很强的非均质性。这要求我们在进行计算机模拟之前一定要认真分析其地质特征,进行网格密集取样(如本次垂向取样间隔平均为0.2 m,测线间隔平均为24 m),测量各项储层参数,模拟的结果应反映砂体的成因机制,否则模拟的结果就是不可靠的。本文在已建立的原型地质模型的基础上,对计算机模拟方法进行了探讨,所建立的均是二维剖面模型,由于受种种限制,未能建立起物性分布的三维模型并与油田地下资料进行对比,验证模型的可靠程度,这不能不说是一遗憾,但这种尝试无疑是有益的。在今后的研究中应注意寻找与露头类似的油田地下对比物,把露头模型应用于地下,为油田生产服务,发挥露头研究的作用。

在研究过程中,始终得到上级项目负责人裘亦楠、薛叔浩二位专家关心和指导,王建国副教授的许多具体帮助,在此一并深表谢意。

第一作者简介 伍涛男 1970年出生 博士研究生 石油地质

作者单位:伍涛 王德发(中国地质大学能源系 北京 100083)

杨 勇(新星石油公司勘探开发研究院 北京 100083)

参考文献

- [1] 王仁铎, 胡光道.线性地质统计学 [M].北京:石油工业出版社, 1989.226
- [2] 裘亦楠.碎屑岩储层沉积基础 [M].北京:石油工业出版社, 1987.14 ~ 19
- [3] 孙洪泉.地质统计学及其应用 [M].江苏:中国矿业大学出版社, 1990.218
- [4] DL 特科特.分形与混沌—在地质和地球物理学中的应用 [M].北京:地震出版社, 1993.6
- [5] 于兴河, 李剑峰.碎屑岩系储层地质建模及计算机模拟 [M].北京:地质出版社, 1996.59

收稿日期: 1998-03-04 收修改稿日期: 98-04-21