

非均质多孔介质特征参数的描述方法及应用

陈慧新, 刘日武, 官欣, 张大为

(中国科学院力学研究所 工程科学部, 北京 100080)

摘要:在普通 Kriging 法的基础上, 利用适合油藏数据对数正态 Kriging 法对表征非均质性的油藏特征参数孔隙度、渗透率等进行估值并画出等值线图. 通过比较两种方法的估值结果, 发现这两种地质统计学方法在描述油藏多孔介质的非均质性方面各有各的适用范围. 普通 Kriging 法更适合于特征参数呈非正态分布关系的情况, 对数正态 Kriging 法更适合于特征参数呈对数正态分布的情况. 这为非均质油藏描述方法的选择提供了合理的判据.

关键词:地质统计学; (普通 Kriging); (对数正态 Kriging 方法); 非均质; 特征参数

中图分类号:TE321; O357.3 **文献标识码:**A

0 引言

均质油藏中流体流动已有很好的描述, 描述非均质油藏的特征参数, 地质统计学是一个首选的方法^[1]. 地质统计学是法国数学家 G. Matheron 教授于 1962 年创立并发展的一门集数学与地质采矿学为一体的边缘学科. 1977 年传入我国, 经过二十几年的发展, 在最初研究的普通 Kriging 法的基础上, 我国学者更加深入地研究了线性平稳地质统计学、线性非平稳地质统计学、非线性地质统计学、非参数地质统计学、多元地质统计学以及近几年作为地质统计学前沿的时空域多元地质统计学等^[2-4].

地质统计学在应用方面, 从最初的学习和探索, 发展应用到物探、化探、遥感数据处理及找矿预测和地质勘探成果的提交, 其应用领域也从最初的矿山设计, 发展到今天的石油及煤田、环境科学、水文工程地质、农田水利及农林科学^[7-11]. 为适应生产的需要, 近些年相继开发推出了适于国内产生需要的软件系统, 地质统计学的理论研究与相应的软件开发并举, 把地质统计学的应用推向深入^[2-5].

地质统计学在石油中应用, 从最初的最优勘探网度的研究, 到利用各种局部 Kriging 法对物探、化探数据的估计和参数预测, 及利用各种 Kriging 法和 Kriging 绘图系统进行油藏描述^[10]. 如 1990 年王家华等^[5]作了 Kriging 绘图系统(KMS)在牛庄油田油藏描述技术中的应用, 张树泉、侯景儒等^[6]在 1992 年对新疆塔里木盆地某油田探区作了地球化学数据的地质

基金项目:中国科学院重点资助项目(KJ CX2-SW-1); “973”资助项目(2002CB412703)

作者简介:陈慧新, 女, 博士生. E-mail: lywu@imech.ac.cn

统计学分析. 本文在最简单的普通 Kriging 法的基础上, 利用适合油藏数据的对数正态 Kriging 法对表征非均质性的油藏特征参数进行研究.

1 基本原理及准则

1.1 普通 Kriging 原理及应用准则

从数学角度来说, 普通 Kriging 法是一种对空间分布数据求最优、线性、无偏内插估计量的方法. 用矿业术语来说, 它是根据一个待估块段 V 临域内的若干信息样品的品位数据 $Z_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$, 在考虑了这些样品的形状、大小及相互位置关系, 它们与待估块段之间的空间位置等几何特征, 以及品位的变差函数模型所提供的结构信息之后, 为了对该块段品位作出一种线性、无偏、最小估计方差的估计而对每个样品值赋予一定的权系数 $\lambda_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$, 最后进行加权平均来估计该块段品位的方法.

$$\text{无偏性条件: } \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 1$$

估计方差最小条件: 在满足无偏性条件下, 估计方差的公式是:

$$\sigma_E^2 = \bar{C}(V, V) - 2 \sum_{\alpha} \lambda_\alpha \bar{C}(V, v_\alpha) + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_\alpha \lambda_\beta \bar{C}(v_\alpha v_\beta), \text{ 即求在满足无偏性条件的前提下,}$$

使得估计方差 σ_E^2 达到极小的诸权系数 $\lambda_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$.

用拉格朗日方法求条件极值, 得普通 Kriging 方程组为

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta \bar{C}(v_\alpha v_\beta) - \mu = \bar{C}(v_\alpha, V) \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 1 \end{cases} \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{普通 Kriging 方差为: } \sigma_E^2 = \bar{C}(V, V) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \bar{C}(V, v_\alpha) + \mu$$

1.2 对数正态 Kriging 原理及应用准则

1.2.1 对数正态守恒假设

当样品值呈对数正态分布时, 其样品值的平均值也呈对数正态分布, 而且它们的联合分布也保持对数正态分布. 但是, 对数正态分布的线性组合不符合对数正态分布^[2].

设定义于支撑 $v_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$ 上的区域化变量 x_α 呈对数正态分布, 其数学期望值为 Z , 方差为 $\bar{C}(v_\alpha, v_\alpha)$, 即 $Z = E\{x_\alpha\}$, $D^2(x_\alpha) = \bar{C}(v_\alpha, v_\alpha)$, 则 $y = \ln(x_\alpha)$ 呈正态分布, 它的数学期望为 $Z = E\{\ln(x_\alpha)\}$, 方差为 $\bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha) = D^2\{\ln(x_\alpha)\}$, 则它们之间的关系是:

$$Z = \exp\left[Z_e + \frac{1}{2}\bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha)\right], \bar{C}(v_\alpha, v_\alpha) = Z^2[\exp\bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha) - 1].$$

当定义于相同支撑 $v_\alpha, v_\beta (\alpha, \beta = 1, 2, \dots, n)$ 上的区域化变量 x_β, x_α 是联合对数正态分布, 其期望值为 Z , 协方差为 $\bar{C}(v_\alpha, v_\beta)$, 则 $\ln(x_\alpha), \ln(x_\beta)$ 呈联合正态分布, 其协方差为 $\bar{C}_e(v_\alpha, v_\beta)$, 这时, $\bar{C}(v_\alpha, v_\beta) = Z^2[\exp\bar{C}_e(v_\alpha, v_\beta) - 1]$.

1.2.2 对数正态 Kriging 法

设矿床 D 的样品值及块段品位值均服从对数正态分布, 该矿床 D 内某待估块段 $V \in D$

的平均品位值为 Z_V , Z_V 的估计值为 Z_V^* , 其对数值 $\ln Z_V^*$ 可表为 n 个已知信息值 $\ln(Z_\alpha)$ ($\alpha = 1, 2, \dots, n$) 的线性组合, $\ln Z_V^* = C + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \ln(x_\alpha)$, 式中, C, λ_α 为待定系数, x_α 为定义于信息支撑 v_α ($\alpha = 1, 2, \dots, n$) 的 n 个信息样品观测值.

与普通 Kriging 法相似, 对数正态 Kriging 方程组为

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta \bar{C}_e(v_\alpha, v_\beta) - \mu = \bar{C}_e(v_\alpha, V) \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 1 \end{cases}$$

其矩阵形式是: $[K_e][\lambda] = [M_{2e}]$. 该方程组为 $n+1$ 阶线性方程组, 求解后可得 n 个权系数 λ_α ($\alpha = 1, 2, \dots, n$) 及一个 μ , 而 C 的简化式可表为

$$C = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha [\bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha) - \bar{C}_e(v_\alpha, V)] - \mu \right\}$$

$$Z_V^* = \exp \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \left[\ln(x_\alpha) + \frac{1}{2} \bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha) \right] - \left[\frac{1}{2} \bar{C}_e(v_\alpha, V) + \frac{1}{2} \mu \right] \right\}$$

估计量 Z_V^* 的 Kriging 方差是:

$$\sigma_k^2 = Z_V^{*2} \left\{ \exp \bar{C}_e(V, V) + \exp \left[\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \bar{C}_e(v_\alpha, v_\alpha) \right] - 2 \exp \left[\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha \bar{C}_e(v_\alpha, V) \right] \right\}$$

2 地质统计学在多孔介质非均质性描述中的应用

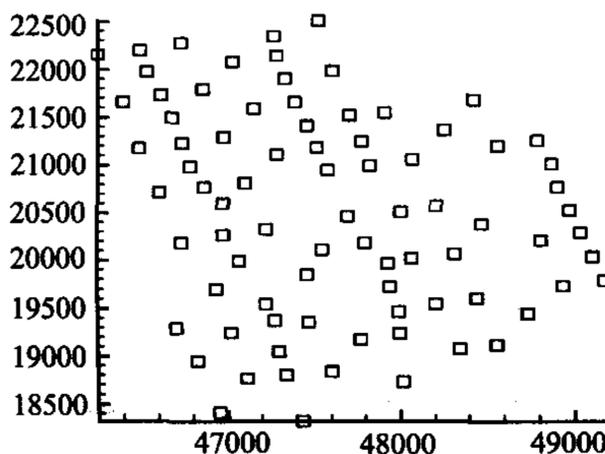


图 1 分析区块的井位图

Fig. 1 Well locations of analysis region

2.1 油田概况

选择中国某油田的一个区块作为研究应用对象. 该油田是国内投入开发最早的特低渗透油田. 自 1996 年 10 ~ 11 月测试获得 $1.05 \text{m}^3/\text{d}$ 工业油流发现油田以来, 陆续发现了更多的石油和天然气储量. 根据已有的现场井点资料, 本文对该区块 P 层的孔隙度、渗透率及有效厚度进行分析, 该区块的井位图如图 1 所示.

对该区块井位上的孔隙度、渗透率和有效厚度进行统计分析, 得它们的均值等统计特征参数见表 1.

表 1 几种特征参数的统计特征参数表

Tab. 1 Table of some statistical characteristic parameters

	均值	方差	均方差	C_v 值	C_s 值	EC 值	概率分布类型
孔隙度	27.481	1.859	1.363	0.068	-0.455	-1.072	正态分布
渗透率	0.218	0.037	0.194	0.172	309.559	398.427	非正态分布
有效厚度	0.467	0.048	0.218	0.102	87.488	377.763	非正态分布

注: 表中 C_v 为变异系数, C_s 为偏态系数, EC 为峰态系数.

通过观察表格中的数据, 可以知道对于孔隙度分布, 它呈正态分布关系, 而对于渗透率

和有效厚度,它们呈非正态分布.通过观察峰态系数和偏态系数值,可以知道孔隙度数据分布较离散,且多在低分端,而渗透率和有效厚度数据集中且分布在低分端.

2.2 Kriging 分析结果

对该区块井位上的孔隙度、渗透率和有效厚度分别用普通 Kriging 法、对数正态 Kriging 法进行估计,并用等值线的形式描述如图 2~7.

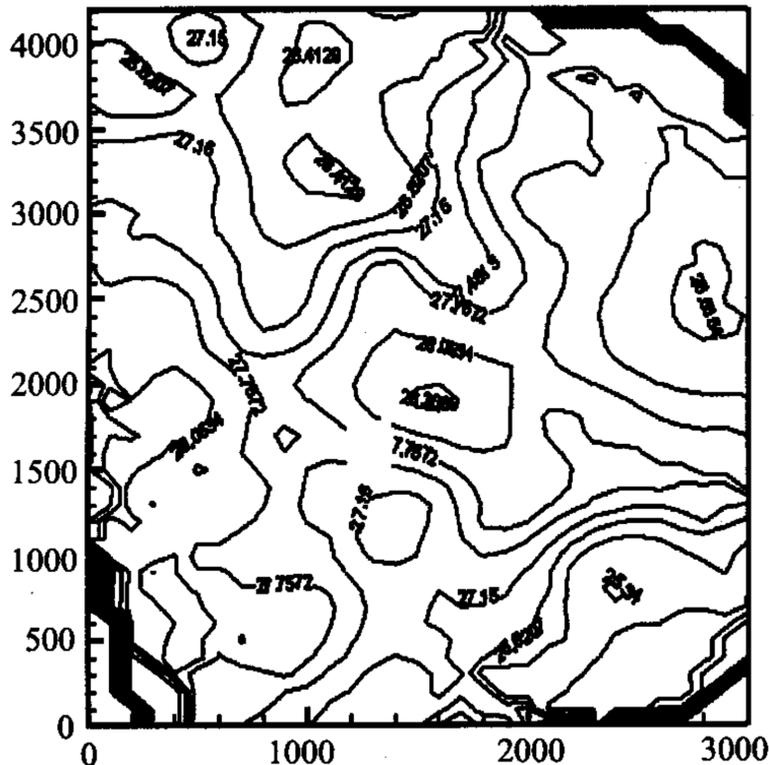


图2 普通 Kriging 法分析孔隙度分布图
 Fig.2 Porosity distribution results from Ordinary Kriging method

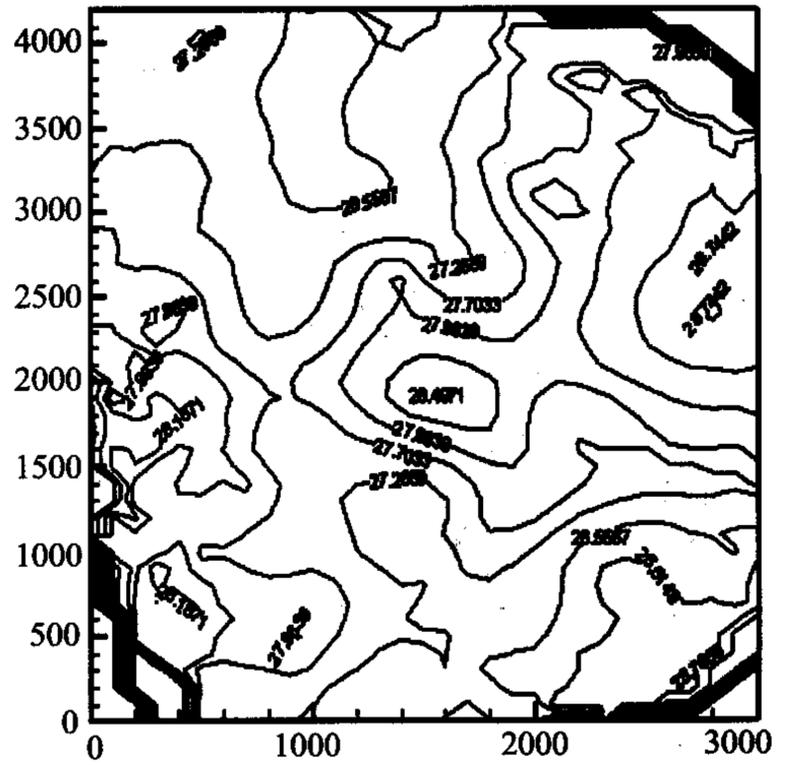


图3 对数正态 Kriging 法分析的孔隙度分布图
 Fig.3 Porosity distribution results from lognormal Kriging method

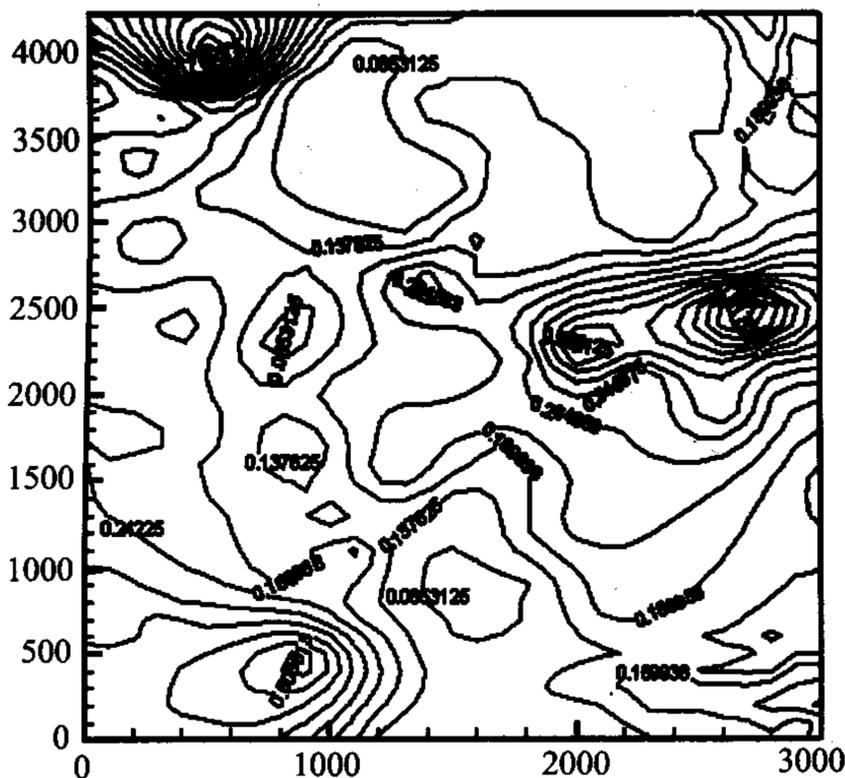


图4 普通 Kriging 法区块的渗透率分布图
 Fig.4 Permeability distribution results from Ordinary Kriging method

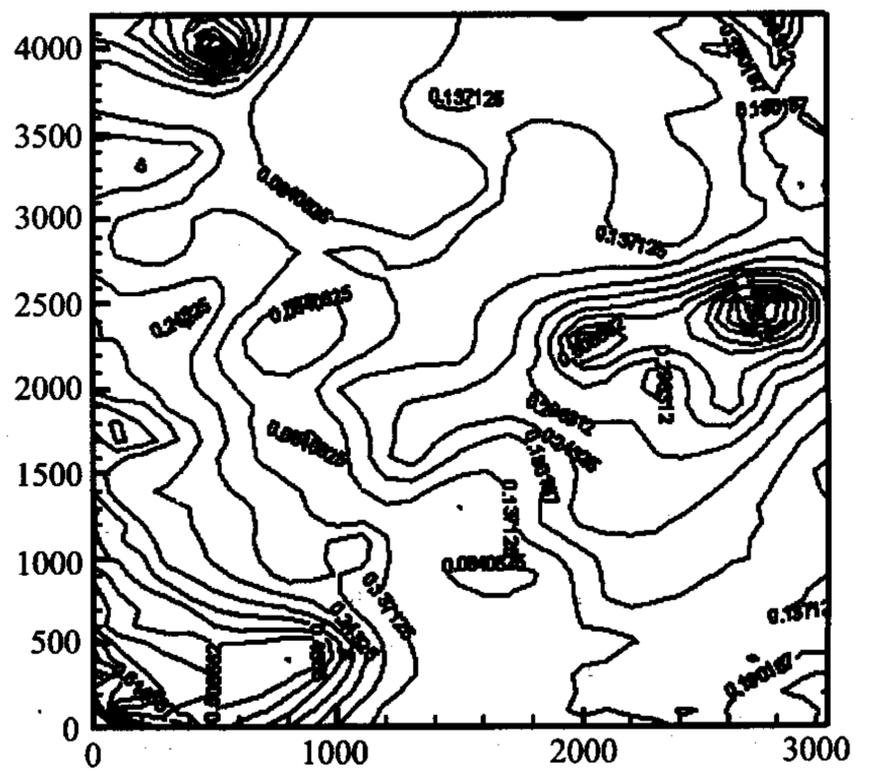


图5 对数正态 Kriging 法区块的渗透率分布图
 Fig.5 Permeability distribution results from lognormal Kriging method

2.3 结果讨论

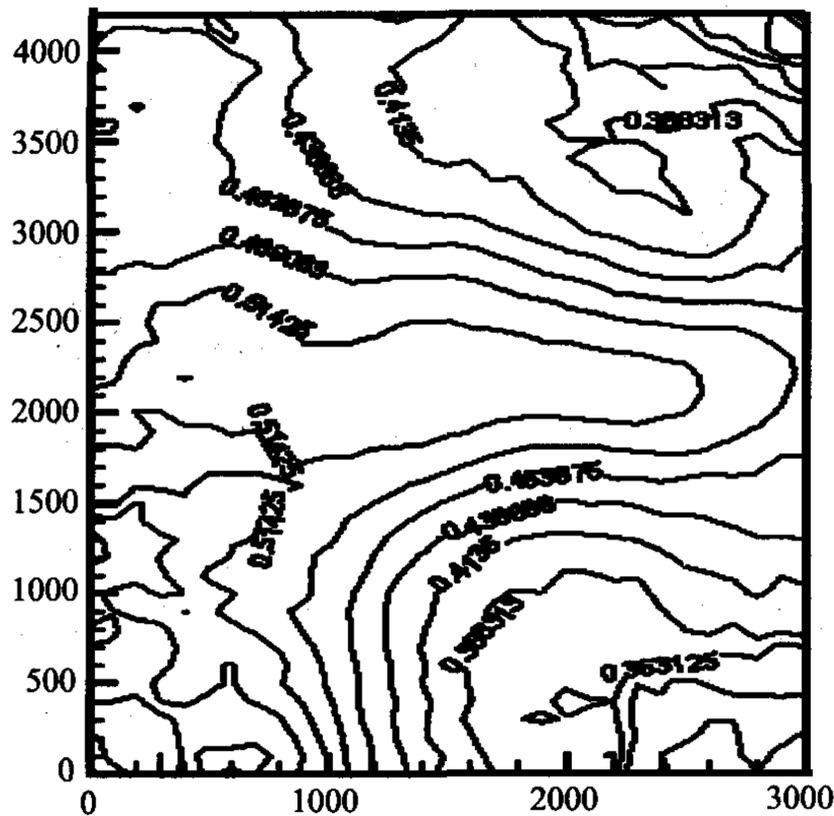
对图 2 和图 3,图 4 与图 5 的数据用离散方差检验进行分析,得到检验系数: $I_{k_1} = I_{k_2} = 767.868, I_{s_1} = 0.86, I_{s_2} = 0.83$. 所以对孔隙度来说,对数正态 Kriging 法估值效果相同或者更优,这与它们的分布呈非正态分布有关. 为了寻找原因,对这两组数据对数变换后来求它

的数据分布如表 2.

表 2 几种特征参数的统计特征参数
Tab. 2 Some statistical characteristic parameters

	均值	方差	均方差	C_v 值	C_s 值	EC 值	概率分布类型
孔隙度	3.312	0.003	0.051	0.016	-1.517	8.297	非正态分布
渗透率	1.867	0.805	0.897	-0.481	-0.647	4.003	正态分布

从表 2 数据看出,渗透率数据是对数正态分布,故对数正态 Kriging 法更适合它. 对图 6 和图 7 的数据用离散方差检验法进行分析, $I_1 = 0.269$, $I_2 = 0.280$. 普通 Kriging 法的效果更优,因为数据序列呈正态分布,用对数正态 Kriging 法分析正态分布数据不一定最优.



参 考 文 献

- [1] 沈平平. 油水在多孔介质中的运动理论和实践[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [2] 侯景儒,等. 实用地质统计学[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [3] 王仁铎,胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [4] 肖斌,赵鹏大,等. 地质统计学新进展[J]. 地球科学进展,2000. 15(3):293-297.
- [5] 王家华,高海余,等. 克立金地质绘图技术[M]. 北京:石油工业出版社,1999.
- [6] 侯景儒,张树泉. 协同区域化与协同克立格[J]. 北京科技大学学报,1991,13(2):95-103.
- [7] 冉启全,周南翔. 油气藏非均质性的地质统计学描述[J]. 大庆石油地质与开发,1993,12(6):42-46.
- [8] 熊琦华,陈亮. 地质统计学在储层表征中的作用[J]. 断块油气田,1997,4(1):21-28.
- [9] 陈亚新,史海滨,陈慧新. 盐溶质及其离子品位空间变异性的 Co-Kriging 估计[J]. 水利学报,1998. (6):35-40.
- [10] Rossini C, *et al.* Combined geostatistical and dynamical simulations for developing a reservoir management strategy :A case history[J]. Journal of Petroleum Technology, 1994, 46, 979-985.
- [11] Chen Y Q, Zhao P D. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, Eastern China [J]. Nonrenewable Resources, 1998, 7(1):37-44.

Characteristic Parameter Description Approach and Its Application in the Heterogeneous Porous Media

CHEN Hui-xin, LIU Yue-wu, GONG Xin, ZHANG Da-wei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based on the ordinary Kriging method, the lognormal Kriging method adapted for heterogeneous reservoir is used to analyze the characteristic parameters such as the permeability, porosity and net pay thickness in the formation P of one oil field in this paper. Comparing the characteristic parameters of the contour generated from these two methods, it is found that the two methods have different application ranges in the heterogeneous characteristic parameter analysis. The ordinary Kriging method is generally suitable for cases in which the parameters obey normal distribution. otherwise the lognormal Kriging method is more suitable for cases where the parameters do not obey normal distribution. This study applies a criterion for the method selection of reservoir description and the enhanced fundamental base of the fluid flow mechanics research in the heterogeneous reservoir.

Key words: geostatistics; ordinary kriging; lognormal kriging; heterogeneity; characteristic parameter