

序贯高斯模拟在矿石品位估计中的应用研究

刘占宁, 宋宇辰, 孟海东, 于晓燕

(内蒙古科技大学矿业研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 随机模拟是地质统计方法的重要内容。在矿石品位估计方法中克里格方法作为一种无偏估计方法,常被用于矿石品位的估计。但克里格法估值存在平滑效应。作者在分析序贯高斯模拟和普通克里格法基本原理的基础上,运用序贯高斯模拟方法和普通克里格方法对某铁矿体内全铁(TFe)品位进行估计,给出了品位估计结果模型。研究从勘探线方向、垂直勘探线方向和竖直方向分别计算变差函数,对球状模型、指数模型、高斯模型的变差函数拟合效果进行了优选,结果表明球状模型拟合效果最好。针对序贯模拟和克里格品位估值效果进行了分析,结果显示:序贯高斯模拟结果在品位分布形态上更接近样品品位分布形态,其平滑效应更小;克里格方法估计与序贯高斯模拟方法相比仅在品位均值方面更接近样本品位均值。因此,认为序贯高斯模拟方法可以更好地刻画矿体内品位分布状态。

关键词: 序贯模拟;变差函数;矿石品位;克里格法

中图分类号: P628.2 **文献标识码:** A

0 引言

条件模拟技术是地质统计学中继克里格估计技术之后,迅速发展的一种新方法^[1]。在以往的矿石品位估计中,距离幂次反比法^[2-3]、克里格方法^[4-5]是应用比较多的方法,此外,还有学者创建了SD储量估算方法^[6],也有学者将多基因遗传规划方法^[7]、支持向量基方法用于储量估算^[8]。上述方法中克里格方法虽然应用较为广泛,但其估值结果存在明显的平滑效应。

Deutsch和Journel在1992年提出了序贯高斯模拟方法,此方法可克服克里格方法估值带来的平滑效应。但在以往研究中,序贯高斯模拟方法主要被用于储层建模方面。胡先莉等通过在储层建模中对克里格和序贯模拟方法进行了比较^[9]。白蕾等运

用序贯高斯模拟方法从储层特征和沉积相等着手,建立了鄂尔多斯盆地合水地区长6₃油藏的储层地质模型,确定了该区域油藏物性的控制因素^[10]。江贵荣等在研究土壤盐分的空间分布中,指出了克里格法降低了土壤盐分的空间变异性,序贯高斯模拟数据可以更好反映土壤盐分的空间变异性^[11]。贾云超等研究显示序贯高斯方法最能精细刻画储层地质特征以及有效储层的空间展布^[12]。姜晓宇等采用序贯高斯协模拟的方法很好地估计了尼日尔T盆地F地区的孔隙度分布^[13]。冯建伟等在中小尺度裂缝适合优选使用了序贯高斯模拟方法,研究显示该方法确定的地质模型与实际井点数据和开发动态数据吻合度高^[14]。戴婉薇等采用序贯高斯模拟建立了南苏丹某油田的地层模型,研究显示储层物性和含油性预测的分辨率和精度均得到了提高^[15]。乐友喜等基于序贯高斯模拟的速度场随机建模方法分析了构造图上的圈闭面积的分布特征^[16]。

收稿日期: 2017-10-10; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:71363040)资助。

作者简介: 刘占宁(1985—),男,博士研究生,主要从事数字矿山和矿山资源评价方面的研究。通信地址:内蒙古包头市阿尔丁大街7号,内蒙古科技大学矿业研究院;邮政编码:014010。

通信作者: 宋宇辰(1958—),女,教授,博士,博士生导师,主要从事矿业信息系统和数据挖掘方面的研究。通信地址:内蒙古包头市阿尔丁大街7号,内蒙古科技大学矿业研究院;邮政编码:014010;E-mail:494570031@qq.com

近几年序贯高斯模拟方法出现在了矿石品位估计中,但此类研究较少。刘修国等运用克里格方法确定矿化带边界和品位估值,并指出用序贯高斯模拟方法可以克服普通克里格方法在储量估值时造成的平滑效应的影响^[17]。李迪等引入序贯高斯模拟方法进行储量估算模型的分层更新并认为序贯高斯模拟能够再矿石品位分布^[18]。为了进一步研究序贯高斯模拟方法在矿体品位估计中的效果,本文将通过普通克里格方法和序贯高斯模拟方法对某铁矿的全铁(TFe)品位进行品位估计效果对比。

1 基本理论

1.1 变差函数

变差函数是地质统计分析的特有函数,其反映了一个采样点与其相邻采样点的空间关系。区域化变量 $Z(x)$ 在点 x 和 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 差的方差的一半称为区域化变量 $Z(x)$ 的半变差函数,记为 $r(h)$,计算公式有^[19]:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i+h))^2 \quad (1)$$

1.2 普通克里格法

设待估块段 V 附近有 n 个采样点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其值记为 $Z(x_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 待估块段 V 的真值是估计邻域内 n 个信息值的线性组合,计算公式有^[20]:

$$Z_v^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

在满足 $Z_v^*(x)$ 为 $Z_v(x)$ 的无偏估计量,且估计方差最小的情况下,计算权重系数 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的值。可求 n 个权重系数 λ_i 的偏导数,并令其为 0, 和无偏性条件联立建立方程组。公式(3)给出了变差函数的表达式表示的解:

$$\lambda = K^{-1} \cdot M \quad (3)$$

其中:

$$K = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \cdots & \gamma(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, V) \\ \gamma(x_2, V) \\ \vdots \\ \gamma(x_n, V) \\ 1 \end{bmatrix}$$

1.3 序贯模拟

为了直观,作者仅在块体模型内某一层内序贯高斯模拟过程的进行介绍。在某些网格上有已知的连续参数值,这里参数值可以看作矿石的品位。已知的值则是钻孔取样获取的样品。网格点是指网格的中心点。序贯高斯模拟原理如下:

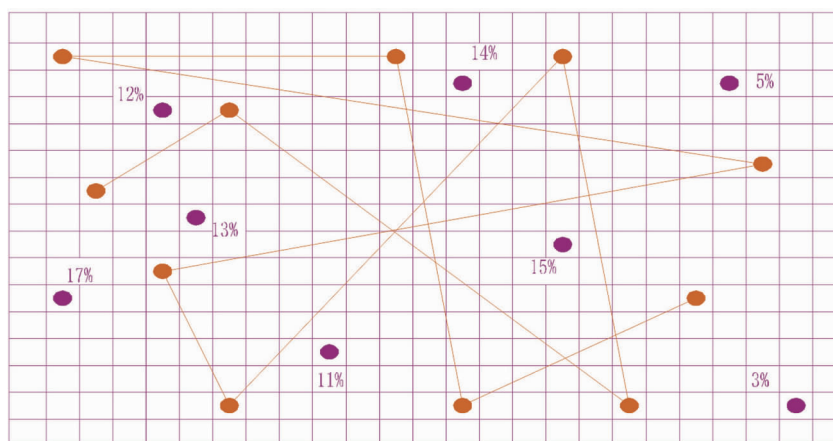


图1 序贯高斯模拟网格点游走过程

Fig. 1 Mesh point selection process in Sequential Gaussian Simulation

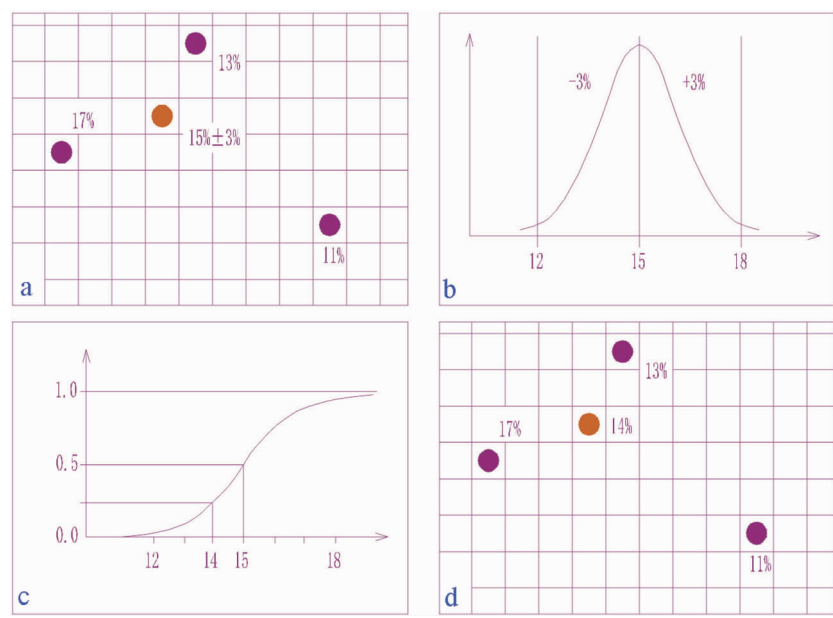


图 2 序贯高斯模拟实现过程

Fig. 2 Sequential Gaussian Simulation implementation process

a. 克里金值及 2 倍标准差; b. 可能值的分布;

c. 累计概率分布,对于均与分布在[0,1]上的数进行随机抽样;

d. 随机抽样所确定的问位置

按照随机路径在网格上(没有值的位置)顺序地游走经过数据点(见图 1 所示),在每一个当前点上用已知点上该参数值来计算克里格值和克里格标准偏差(图 2a 所示)。然后建立该参数的一个高斯分布,使该分布的中心对应得到的克里金值,而标准偏差与计算得到的标准偏差相等(图 2b 所示)。也就是说这样就能确定在这个点上参数有什么样的数值和什么样的概率。随后将这个概率变成实现——从这个分布中随机的选择某个值(图 2c 所示),将其赋值给所计算的点(见图 2d 所示),然后将赋值后的点加入到已知点数据中,这样这个计算点就变成了样品值点。同样的道理,在网格选择下一个随机点,并且保证这个点不与已经确定值的点重合。对于下一个要估计的点,在估计的过程中,上一个点的估计值将被当作已知点对待,并用于以后点的估计中。所有网格点计算完成后,即为计算的一次实现。

2 应用实例

2.1 数据准备

论文以内蒙古某铁矿为实例,构建了该铁矿矿体三维实体模型(图 3)和块体模型,选用钻探获取的 TFe 品位为采样信息(图 4),对矿体内 TFe 品位

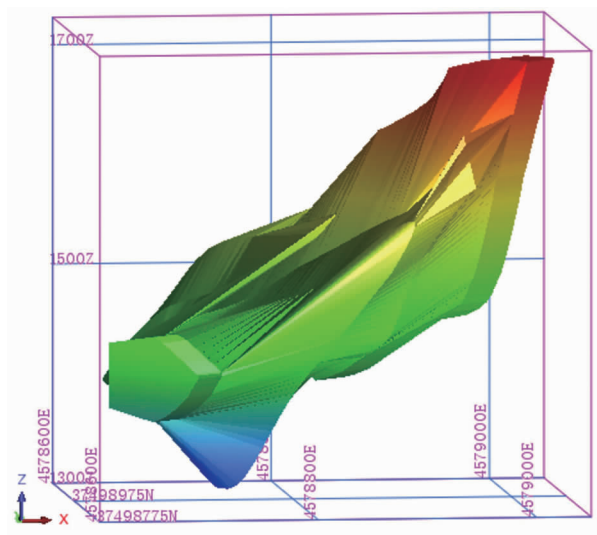


图 3 矿体三维模型

Fig. 3 3D model of ore body

分布进行了克里格估计和序贯高斯模拟估计。

2.2 变差函数的拟合

对于铁矿体的样品 TFe 品位数据进行变差函数计算,计算结果显示,沿勘探线方向(主方向)和竖直方向(次方向)的变差函数形态较好。而垂直于勘探线方向(次主方向)试验变差函数形态不够理想,这主要由钻孔空间分布特征及矿体构造原因所致。

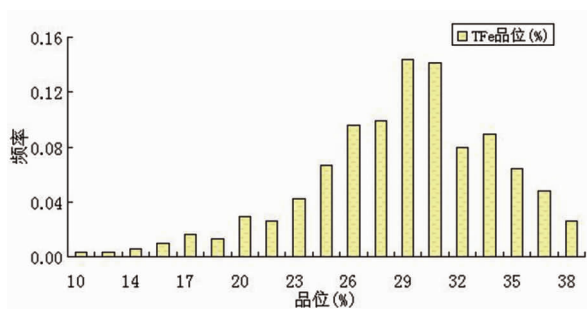


图 4 样品品位分布直方图

Fig. 4 The histogram of the grade of the sample

对于三个方向的变差函数进行理论拟合,拟合采用了球型模型、指数模型和高斯模型三种变差函理论模型。

图 5、图 6 和图 7 为铁体矿石样品 TFe 品位从不同方向的变差函数的拟合曲线。其中,指数模型由于指数模型拟合的结构不明显,拟合效果不理想;高斯模型在变程范围内理论曲线的凹凸特性与试验变差函数恰恰相反,其拟合效益亦不够理想;球型模型在结构较好,且变程范围内的拟合效果也较好,球型模型的拟合要效果要好于指数模型和高斯模型。

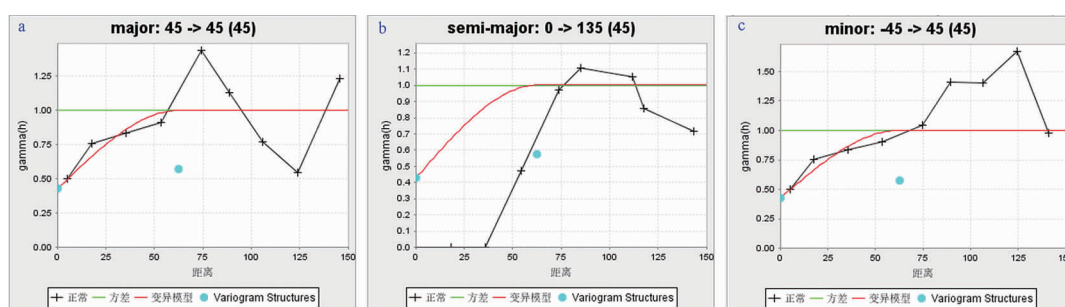


图 5 球型模型变差函数拟合图

Fig. 5 A fitting diagram of the variation function based on the spherical model

a. 主方向变差函数; b. 次主方向变差函数; c. 次方向变差函数

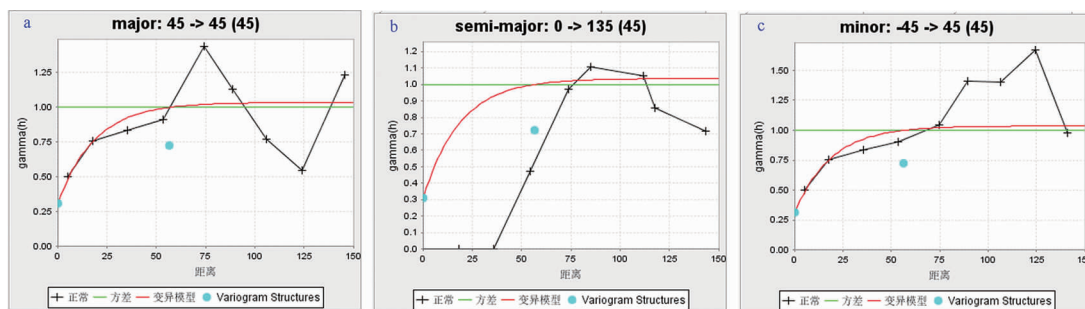


图 6 指数模型变差函数拟合图

Fig. 6 A fitting diagram of the variation function based on the index model

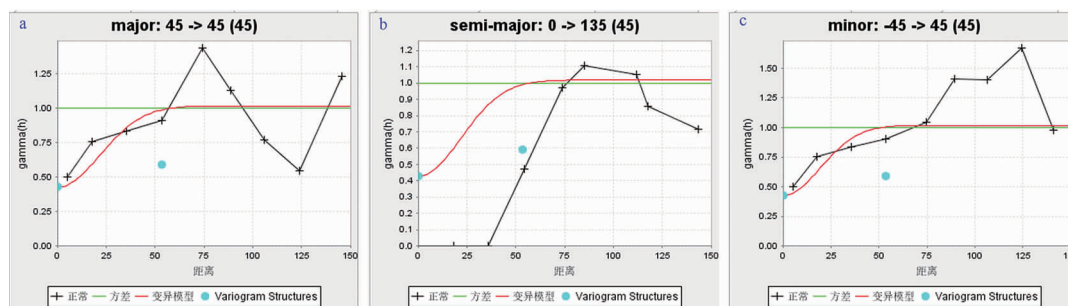


图 7 高斯模型变差函数拟合图

Fig. 7 A fitting diagram of the variation function based on the Gaussian model

因此,选用球型变差函数模型作为变差函数的理论模型。在序贯高斯模拟和普通克里格估值时亦采用球型模型作为品位估计时的变差函数理论模型。

2.3 估值结果分析

使用克里格方法和序贯高斯模拟方法,对于铁矿体内的 TFe 品位进行估值,建立克里格和序贯高斯模拟估值结果的品位模型(图 8)。对于估值的 TFe 品

位平均进行统计(图 9)。在三维品位模型的基础上,在 Z 轴方向上对于估值品位进行趋势分析,分析标高在 1 310 m—1 570 m 范围内不同标高段(间隔 20 m 为 1 段)估值品位最小值、最大值和均值变化情况,并与原始样品的 TFe 品位变化趋势进行对比(图 10)。

从估值品位直方图(图 9)不难看出,普通克里格估算结果(图 9a)与样品品位分布(见图 4)相差较

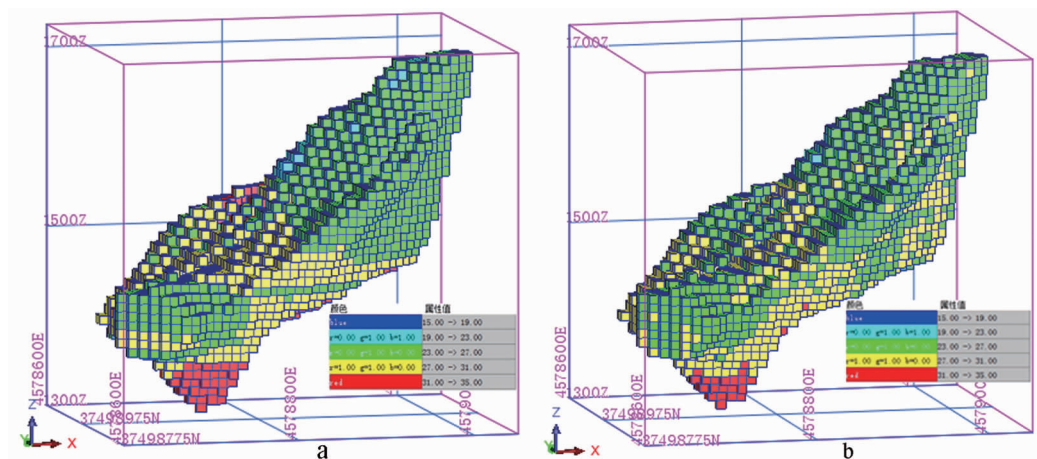


图 8 估值品位模型

Fig. 8 Model of evaluation grade

a. 克里格估值品位模型; b. 序贯高斯模拟估值品位模型(500 次实现)

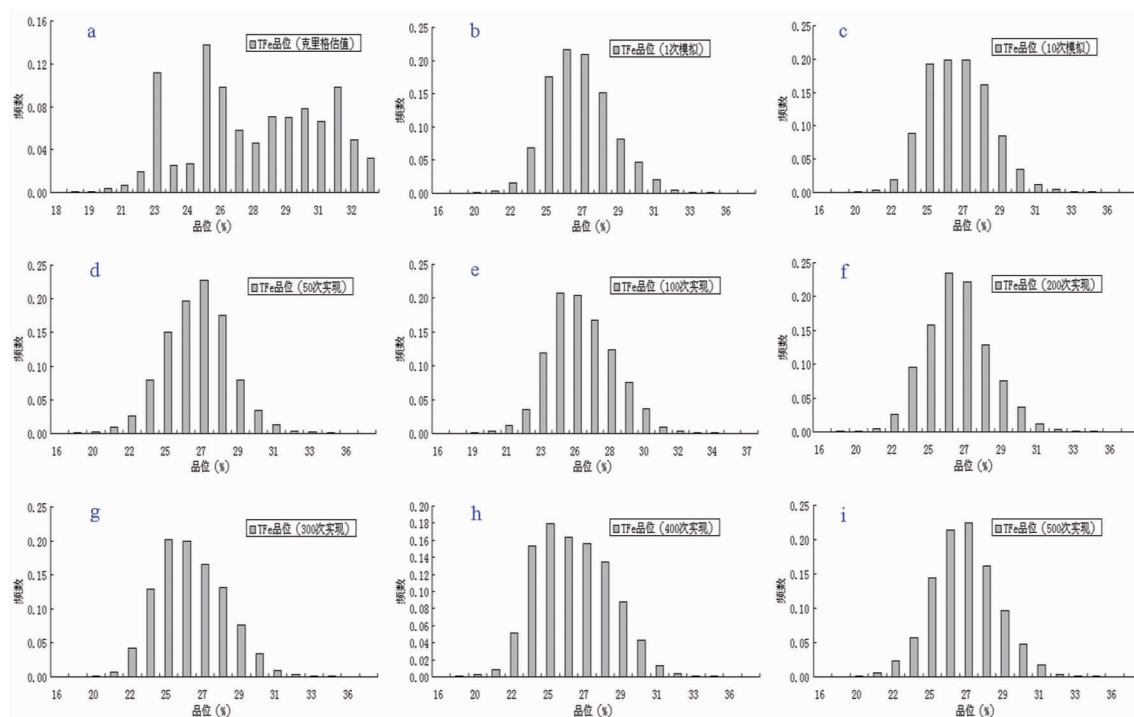


图 9 估值品位分布直方图

Fig. 9 Histogram of the distribution of the evaluation grade

a. 克里格估值品位品分布图;

b—i. 序贯高斯模拟 1、10、50、100、200、300、500 次实现时的估值品位分布

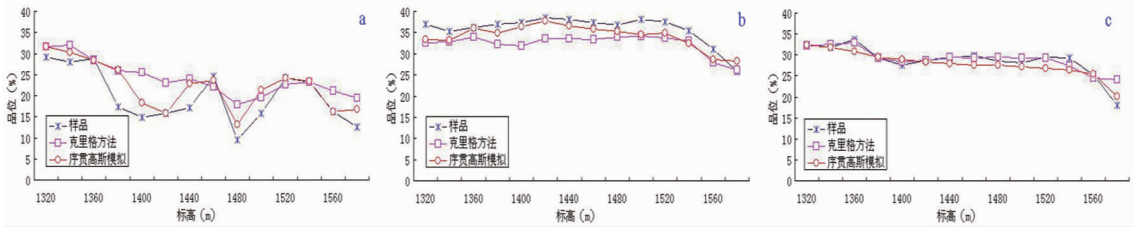


图 10 估值品位 Z 轴方向变化趋势图

Fig. 10 The variation trend of the evaluation grade value along the Z axis

a. 品位最小值; b. 品位最大值; c. 品位均值

表 1 样品与估值品位基本统计

Table 1 Basic statistics of sample and evaluation grade

名称	最小值	最大值	均值	方差	标准差	偏度	峰度
原始样品品位	9.53	38.54	28.87	25.02	5.00	-0.70	3.77
克里格法估值品位	17.86	34.05	27.94	10.51	3.24	-0.05	1.93
1 次	15.81	37.77	27.02	3.88	1.97	0.34	3.63
10 次	15.81	37.77	26.87	3.83	1.96	0.32	3.61
50 次	15.81	37.77	26.93	4.00	2.00	0.10	3.85
100 次	15.81	37.77	26.51	4.34	2.08	0.29	3.49
200 次	15.81	37.77	26.77	3.76	1.94	0.30	3.79
300 次	15.81	37.77	26.51	4.20	2.05	0.35	3.32
400 次	15.81	37.77	26.54	4.94	2.22	0.29	2.96
500 次	15.81	37.77	27.12	3.86	1.96	0.17	3.63

大;序贯高斯模拟结果(图 7b—图 7i)与图 4 的结果更相近。对估计品位的统计(表 1)表明:最小值、最大值、方差、标准差、峰度和偏度等统计量中序贯高斯模拟结果相比于普通克里格法更接近原始样品,说明序贯高斯模拟估计的矿石品位分布与样品品位更近接近,即序贯高斯模拟结果更接近于矿体内品位分布的实际状况。克里格估值结果仅在品位均值方面更接近样品数据。

从图 10 中 Z 轴方向估值品位的变化趋势知,标高较高时(近地表范围内)内矿石品位较低,在标高+1540 m 以下矿石品位相对稍高,向深部呈略升高趋势。

综上,序贯高斯模拟估值的最小值、最大值变化趋势与样品品位相应值的变化趋势更接近,克里格估计则表现出较显著的平滑效应;而克里格估值品位均值的变化趋势与样品的品位均值的变化趋势更接近。估值结果趋势分析与基本统计结果一致。序贯高斯模拟方法在 TFe 品位估计中减小了平滑效应对估值结果的影响。

3 结论

(1)通过对铁矿石的样品 TFe 品位数据的变差

函数的计算和拟合,确定使用拟合效果最佳的球型变差函数作为序贯高斯模拟和普通克里格估计的理论变差函数。

(2)通过对估计品位的基本统计分析和 Z 轴方向的趋势分析可知,序贯高斯模拟估值的品位分布形态与原始样本更接近,序贯高斯模拟相比于普通克里格方法能够更好的刻画铁矿体内 TFe 分布状态。

参考文献:

[1] 印兴耀,贺维胜,黄旭日. 贝叶斯-序贯高斯模拟方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005(5): 28-32.

[2] 宋宇辰,刘占宁,孟海东,等. 矿石体重取值方法对储量估算的影响——以某铁铜矿为例[J]. 金属矿山, 2015(8): 106-109.

[3] 谭正华,荆永滨,王李管,等. 基于空间变异性的 IDW 矿石品位估值改进方法[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 928-932.

[4] 赵汀,王登红,王瑞江,等. 离子吸附型稀土矿储量动态估算方法(RiRee)及其拓展运用[J]. 地球学报, 2017, 38(3): 326-334.

[5] 周旋,王选问,金瑜. 基于地质统计学方法的某铁矿资源量估算[J]. 金属矿山, 2015(7): 86-90.

[6] 柳炳利,郭科,唐菊兴,等. SD 法在西藏甲玛铜多金属矿床资源量估算中的应用[J]. 地质通报, 2012, 31(5): 807-814.

- [7] 韩创益,王恩德,夏建明,等.基于多基因遗传规划的矿石品位估计[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(3):408-411.
- [8] 邓兴升,刘文锴,王瑞芳.基于支持向量机的煤炭储量精确算法[J].煤炭学报,2008(9):1015-1019.
- [9] 胡先莉,薛东剑.序贯模拟方法在储层建模中的应用研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2007(6):609-613.
- [10] 白蕾,张金功,李渭.鄂尔多斯盆地合水地区延长组长6₃岩性油藏储层地质建模[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(6):1601-1609.
- [11] 江贵荣,刘延锋,杨霄翼,等.干旱区剖面土壤盐分空间变异特征及随机模拟[J].地质科技情报,2013,32(2):144-149.
- [12] 贾云超,尹楠鑫,李存贵,等.苏里格气田储层建模方法对比优选分析——以苏6加密实验区块为例[J].断块油气田,2015,22(6):765-769.
- [13] 姜晓宇,计智锋,毛凤军,等.随机模拟技术在储层物性研究中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(6):2665-2668.
- [14] 冯建伟,昌伦杰,孙致学,等.多因素约束下的致密砂岩气藏离散裂缝特征及地质模型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):18-26.
- [15] 戴婉薇,范乐元,胡圣利,等.基于地质统计学反演和储层分类的相控储层建模方法研究及应用[J].地质科技情报,2017,36(1):236-241.
- [16] 乐友喜,曾勉,问雪,等.利用序贯高斯随机模拟分析构造图的不确定性[J].石油地球物理勘探,2017,52(2):333-339.
- [17] 刘修国,尤超,张唯.非线性克里格法在矿体储量估算中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):2068-2072.
- [18] 李迪,胡乃联,李国清,等.基于序贯高斯模拟的储量估算分层更新技术[J].中国矿业,2014,23(3):130-135.
- [19] 李巍,王祖静.甘肃省城市旅游场强的空间格局演化分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):202-208.
- [20] 王炯辉,李毅,黄冬梅,等.基于普通克里格法的泥河铁矿床资源储量估算研究[J].地质与勘探,2013,49(6):1108-1103.

Application of Sequential Gaussian Simulation in Ore Grade Estimation

LIU Zhanning, SONG Yuchen, MENG Haidong, YU Xiaoyan

(Mining Institute, Inner Mongolia University of Science and
Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Stochastic simulation is an important method of geological statistics. The Kriging method is a unbiased estimation method, ften used for ore grade estimation with smoothing effect. Based on analysis of principle of Sequential Gaussian Simulations and Ordinary Kriging method they are used to estimate the TFe grade of a iron ore body and the grade model is given. The variation function is calculated from the direction of the exploration line, the vertical exploration line direction and the vertical direction. The variation function is fitted with the spherical model, the exponential model and the Gaussian model. The fitting effect of he spherical model is the best. The result show that distribution of the Sequential Gaussian Simulation is closer to the distribution of sample grade, with smaller smoothing effect. Compared with Sequential Gaussian method only mean grade value of the Kriging method is closer to to that of the sample. Therefore, the authors believe that the Sequential Gaussian Simulation can better characterize the distribution of ore in the ore body.

Key Words: Sequential Simulation; variation function; ore grade; Kriging method