

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.283>



地质统计学在细脉型矿体模拟中的应用： 以新疆梅岭—红石铜矿为例

张会琼, 刘金辉*, 王京彬, 赵路通, 孙紫坚, 韩英, 熊靓辉

北京矿产地质研究院, 北京 100012

摘要: 细脉状矿体由于矿脉厚度小且沿走向和倾向品位变化较大, 致使其在资源模拟中很难实现三维建模。通过构建高斯变换的二维变异函数转载到单层三维块体模型, 首次完成了对新疆梅岭—红石铜矿区细脉状矿体的三维建模。这一成果弥补了二维模型在空间形态、品位变化特征上的不足, 避免了采用传统极小的子块模型匹配实体模型所产生的高平滑效应。单层三维块体模型能够更加有助于实际采矿生产中块段划分, 具有创新性, 并为矿产资源评价和开发设计提供基础, 对同类矿体的三维建模具有重要的指导意义。

关键词: 细脉型矿床; 地质统计学; 变异函数; 高斯变换; 矿床学。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2018)09-2980-07

收稿日期: 2018-01-21

Narrow Vein Ore Body Modeling by Geostatistics: An Example from Meiling-Hongshi Copper Mine in Xinjiang

Zhang Huiqiong, Liu Jinhui*, Wang Jingbin, Zhao Lutong, Sun Zijian, Han Ying, Xiong Lianghui

Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

Abstract: 3D resource modeling of the narrow vein ore body is challenging due to its small thickness and large grade variations along the vein. This paper completed the three-dimensional modeling for narrow vein ore body of Meiling-Hongshi copper mine in Xinjiang, by building two-dimensional variation function Gaussian transformation into a single 3D block model. This study makes up for the lack of spatial morphology and grade change characteristics in the two-dimensional model. In addition, it avoids the high-smoothing effect of single-layer three-dimensional block model. The innovative monolayer 3D block modeling is not only more helpful to the partition of blocks in actual mining production, but also provides a basis for mineral resources evaluation and development design, which can facilitates future three-dimensional modeling of similar orebodies.

Key words: narrow vein deposit; geostatistics; variation function; Gaussian transformation; ore deposit geology.

地质统计学是以区域变化量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 研究在空间分布上既具有随机性又具有结构性的自然现象的科学, 其空间分析研究法不仅能够有效地揭示属性变量在空间上的分

布、变异和相关特征, 而且还可以将空间格局与成矿元素分布联系起来, 有效解释空间格局对成矿元素分布的影响。

地质统计学自 20 世纪 60 年代末被引入我国

基金项目: 国土资源部行业科研基金项目(No.201411026)。

作者简介: 张会琼(1982-), 女, 高级工程师, 主要从事科技管理与成矿预测研究工作, ORCID: 0000-0002-4525-7016。

E-mail: 123863164@qq.com

* 通讯作者: 刘金辉, E-mail: jhliu0922@qq.com

引用格式: 张会琼, 刘金辉, 王京彬, 等. 2018. 地质统计学在细脉型矿体模拟中的应用: 以新疆梅岭—红石铜矿为例. 地球科学, 43(9): 2980-2986.

后,国内很多学者对其理论与方法进行了探索与研究,各行各业的研究人员也开始将地质统计学应用于各自的领域,前人详细研究了样品信息中特异值的识别及处理、如何应用地质统计学确立最优勘探网度及取样间距,确定最优工业指标和资源储量分类的实施方法;同时对支撑效应、品位—吨位图在资源储量评估中的作用进行了讨论(侯景儒等,1988;侯景儒和黄竞先,2001);介绍了对数正态克立金的基本理论(侯景儒等,1989);介绍了协同克立金的实现原理及在资源储量评价中的应用(王志民和侯景儒,1994),介绍了单元克立金及多元指示克立金的基本理论(肖斌等,2001);探讨了如何在应用地质统计学法时克服主观因素对估值产生的偏差(贾明涛等,2003);研究了适用于我国固体矿产地质勘查规范的矿产资源储量级别地质统计学分类方法,提出利用克立金搜索椭球半径及半径范围内的工程数作为估值结果中工程控制程度的划分依据(孙玉建等,2006)。虽然地质统计学在方法与理论上都有了很大的突破,但是目前还没有真正在地质矿产勘查中形成一套通用的地质统计学矿床建模指导方法,缺乏针对具体某一类矿床的地质统计学模型构建分析与研究。本文以新疆卡拉塔格矿区的梅岭—红石铜矿为研究对象,具体分析二维变异函数转载到三维块体方法,为细脉型矿床的模拟与随后的采矿设计提供一套通用的地质统计学构建方法(Armstong, 1984; Brooker, 1986; Coburn, 1997; 唐攀等, 2013),弥补了二维模型在空间形态、品位变化特征上的不足,避免了采用传统极小的子块模型匹配实体模型所产生的高平滑效应,单层三维块体模型更有助于实际采矿生产中的块段划分。

1 细脉型矿体基本地质统计学理论

对于细脉型矿体,其勘探工作(如钻探或者坑内刻槽工程取样)一般垂直于矿体的展布平面,样品数量一般很少,仅仅取1~2个样品,并且单工程样品与样品之间的矿化品位变化较大,从地质统计学方面考虑,垂直于矿体的展布方向为最小轴方向,由于样品数量很少且块金值很高,很难形成有意义的三维空间变异函数。在构建此类矿体模型时,根据前人经验若采用二维网格模型可以很好地进行矿体模拟,但是由于二维网格模型缺乏空间的属性,在随后的采矿设计与规划中尤显不足。本次研究主要集中在如何构建高斯变换的二维变异函数并转载到三维

块体模型中,这将弥补二维模型的缺陷,为矿产资源评价和开发设计提供基础(侯景儒等,1998;陈小文和宋文革,2009;郭奇峰和刘金辉,2012;周旋等,2015;蒋成荣等,2016)。

1.1 高斯变换

细脉型矿体的另一重要特征是品位在走向与倾向展布平面上具有较高的偏岐特征,因此仅仅依靠原始样品也很难构建合理的二维变异函数。在处理此类偏岐的数据和构建合理的变异函数模型中,高斯变换应用得非常广泛,它可以降低高品位样品在构建变异函数时引起的畸变效应,即很难合理构建;本文利用高斯变换空间特征成功构建了二维试验变异函数与理论变异函数。高斯变换模型是一个数学函数变换,在一个任意分布的新变量Z中,将变量Y进行高斯变换分布,该方程式可表示为以下多项式:

$$\varphi(Y) = \sum_{i=0}^{\infty} \Psi_i H_i(Y), \quad (1)$$

公式(1)中 $H_i(Y)$ 为埃尔米特多项式,其定义为:

$$H_i(Y) = e^{\frac{y^2}{2}} \frac{d^i}{dy^i} e^{-\frac{y^2}{2}}, \quad (2)$$

埃尔米特多项式是属于特殊函数中的一种正交多项式。在实践中,该多项式分为几个区间,而不是严格的递增关系。 Ψ_i 为埃尔米特多项式中的扩张系数。图1显示了该系数绘制的实践定义区间和绝对定义区间曲线特征。

1.2 原始变量转高斯变量

在已经设置的变换方程: $Y: Z = \varphi(Y)$ 基础上,如果将原始变量转为高斯变量,将该方程进行反转,即有: $Y = \varphi^{-1}(Z)$ 。原始变量转高斯变量主要有3种

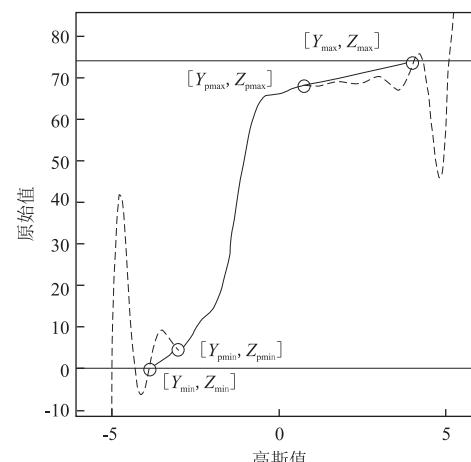


图1 埃尔米特多项式高斯变换

Fig.1 Gaussian anamorphosis by Hermite polynomials

表 1 线性插值反转变换(原始变量转高斯变量)

Table 1 Linear interpolator inversion (raw variable to Gaussian variable)

| 条件 Z | 结果 Y |
|---|---|
| $Z < Z_{\text{amin}}$ | $Y = Y_{\text{amin}}$ |
| $Z_{\text{amin}} \leq Z \leq Z_{\text{pmin}}$ | $Y = \text{linear}(Y_{\text{amin}}, Y_{\text{pmin}})$ |
| $Z_{\text{pmin}} < Z \leq Z_{\text{pmax}}$ | $Y \leftarrow Z = \sum_{i=0}^{NH-1} \Psi_i H_i(Y)$ |
| $Z_{\text{pmax}} \leq Z \leq Z_{\text{amax}}$ | $Y = \text{linear}(Y_{\text{pmax}}, Y_{\text{amax}})$ |
| $Z > Z_{\text{amax}}$ | $Y = Y_{\text{amax}}$ |

表 2 分区间高斯变量转原始变量

Table 2 Gaussian variable into raw variable on intervals

| 条件 Y | 结果 Z |
|---|---|
| $Y < Y_{\text{amin}}$ | $Z = Z_{\text{amin}}$ |
| $Y_{\text{amin}} \leq Y \leq Y_{\text{pmin}}$ | $Z = \text{linear}(Z_{\text{amin}}, Z_{\text{pmin}})$ |
| $Y_{\text{pmin}} < Y \leq Y_{\text{pmax}}$ | $Z = \sum_{i=0}^{NH-1} \Psi_i H_i(Y)$ |
| $Y_{\text{pmax}} \leq Y \leq Y_{\text{amax}}$ | $Z = \text{linear}(Z_{\text{pmax}}, Z_{\text{amax}})$ |
| $Y > Y_{\text{amax}}$ | $Z = Z_{\text{amax}}$ |

方式:线性插值反转、频带反转和经验反转,在本次的原始变量转高斯变量中采用的是线性插值反转。

对于线性插值反转,采用插值变体的逆函数。两个相同的原始值,在变换过程中得到相同的高斯值。这种插值也要考虑以前设定变体方程的区域。原始变量转高斯变量为不同区域转换公式的结果,见表 1。

1.3 高斯变量转原始变量

当高斯变换模型建立以后,从高斯变量到原始变量的反转相对较为容易执行。然而对于所有的数据变量 Y ,变换模型并不严格的增长,被分为 5 个区域,如表 2 所示。

再转出原始样品的空间位置理论变异函数,从而可以合理构建细脉型矿体的地质统计学基础。

2 细脉形矿体模拟:以新疆卡拉塔格矿区梅岭—红石铜矿为例

2.1 研究区背景

梅岭—红石铜矿位于新疆卡拉塔格 Cu-Zn-Au-Ag 矿带中部,整体上呈 EW 向展布。区域上,卡拉塔格矿带属于大南湖古生代岛弧带构造单元。后者为奥陶纪—石炭纪复合岛弧带,发育一套早古生代的海相火山岩含矿建造和一套晚古生代陆相火山岩一次火山岩含矿建造,主要以铜、锌和金矿化为主。卡拉塔格矿带中发育早古生代海相火山岩型 VMS 型矿床、泥盆纪斑岩型矿床和石炭纪陆相火山热液型矿床。本次

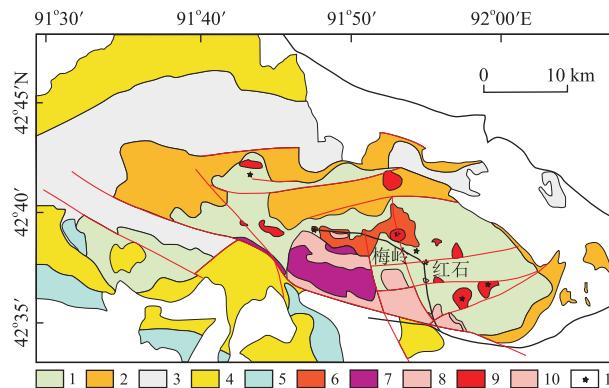
**图 2 卡拉塔格矿区地质简图**

Fig.2 Geological sketch of Kalatage mine area

1.卡拉塔格火山岩系;2.志留纪花岗岩;3.泥盆纪大南湖组;4.志留纪闪长岩;5.白垩系;6.泥盆纪花岗岩;7.二叠系;8.花岗斑岩/次火山岩;9.侏罗系;10.志留纪二长花岗岩;11.推测的火山机构

实例研究的梅岭—红石矿床为陆相火山热液型矿床,区域地质简图如图 2 所示(秦克章等,2001;高珍权等,2006;毛启贵等,2010)。

梅岭—红石矿床为火山热液矿床,矿体主要由石英硫化物矿脉组成的,矿脉主要沿北西向、北东向或近南北向的张性裂隙和断裂发育。含矿围岩为一套玄武岩、安山岩、英安(玢)岩、岩屑晶屑凝灰岩、凝灰质熔岩、流纹斑岩和海西晚期的花岗斑岩(邓小华等,2014)(图 3)。

矿化主要以铜为主,次有金和锌。矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿,矿床浅部发育少量辉铜矿和蓝铜矿。脉石矿物主要为石英、绢云母和绿泥石等。矿石结构以粒状结构为主,矿物结晶粗大,具明显热液充填成矿特征。围岩蚀变包括硅化、绿泥石化、绢云母化、粘土化以及黄铁矿化等(邓小华等,2014)。

梅岭—红石铜矿床的赋矿矿段为中性—中酸性火山岩夹火山碎屑岩段,铜矿脉沿陡—缓倾斜断裂裂隙带呈脉状产出。矿脉的主要产状有两种,分别为近水平走向和北西西走向、倾向南西的系列矿脉。矿体形态各异,矿体沿走向延伸 50~1 000 m、沿倾向延伸数十米到 300 m,平均厚度在 2~40 m 不等,Cu 平均品位在 0.22%~1.36% 之间。前人没有对此类矿体进行过地质统计学的研究,本次地质统计学研究的矿体为 Cu12 矿体,矿体的统计结果与模拟将在后文详述。

2.2 地质统计学特征

2.2.1 基本统计 数据前期准备与处理是地质统计学矿床模型的基础,其中数据预处理和样品组合为后期的变异函数和理论模型提供基本信息。基本

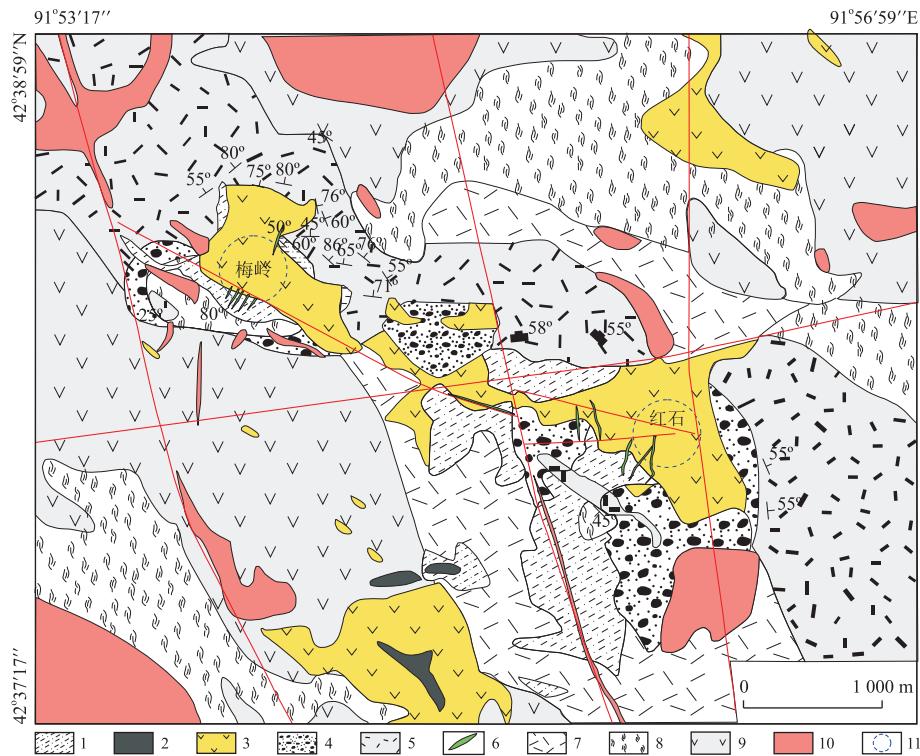


图3 梅岭—红石矿区地质及深部矿体投影

Fig.3 Geological and domains projection map of Meiling-Hongshi mine

1.凝灰质砂岩;2.硅质岩;3.蚀变石英流纹斑岩;4.角砾岩;5.含角砾熔结凝灰岩;6.铜矿脉;7.火山碎屑岩;8.熔结凝灰岩;9.玄武安山岩;10.侵入花岗岩;11.火山机构

表3 Cu12 矿体 Cu 品位与矿化厚度基本统计

Table 3 Basic statistics of Cu grade and thickness on Cu12 domain

| 统计特征 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 方差 | 变异系数 |
|----------|--------|---------|--------|-------|------|
| Cu 原始样品位 | 0.02% | 6.09% | 0.47% | 0.86 | 1.95 |
| Cu 组合样品位 | 0.04% | 2.27% | 0.41% | 0.23 | 1.17 |
| 矿化厚度 | 1.10 m | 19.53 m | 7.38 m | 24.00 | 0.66 |

注:Cu 原始样品个数 153 个,Cu 组合样品个数 27 个,矿化厚度所测样品个数 27 个.

统计一般在单一矿体或者多个类型相同的矿体中进行,在不考虑空间特征时建立直方图是最方便和直接的手段.本文应用的组合样品是以 Cu12 矿化厚度为基础的样品组合,Cu12 矿体整体空间展布为北东向,长约 300 m,倾向北西延伸约 210 m,倾角约 15°.Cu12 中共计测试了 153 个样品,测试方法采用原子吸收分光光度法,编号 DZG93-1,检测限 0.001%,在充分考虑了厚度变量,基本统计与高斯变换后的统计信息如表 3、图 4~图 6 所示.

2.2.2 变异函数模型

变异函数是地质统计学的基础工具,它能够反映地质变量的空间变化特征—相关性与随机性.选择稳健变异函数曲线对本次研究中的 Cu12 矿体中铜品位变异性、以后的块模

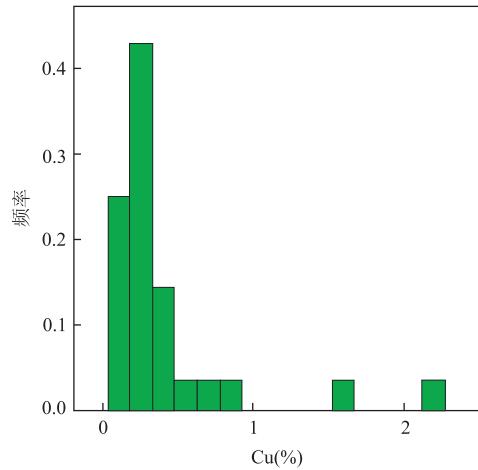


图4 Cu12 矿体的铜品位基本统计

Fig.4 Basic statistics of copper grade on Cu12 domain

型模拟、相应的线性地质统计学和非线性地质统计学研究等均非常重要.在不考虑处理特高品位的情况下,本文中应用高斯变换实质是通过使实验数据接近正态分布来获取较为稳健的变异函数,构建实验变异函数与理论变异函数的基本步骤如下:(1)构建本矿体数据库的试验变异函数,确定本矿体的块金值;(2)原始样品高斯变换并构建矿体的实验变异

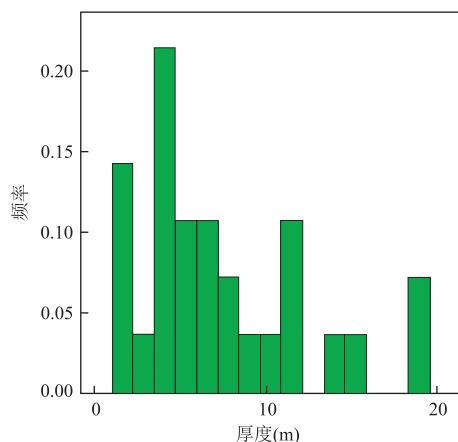


图 5 Cu12 矿体的视厚度基本统计

Fig.5 Basic statistics of visual thickness on Cu12 domain

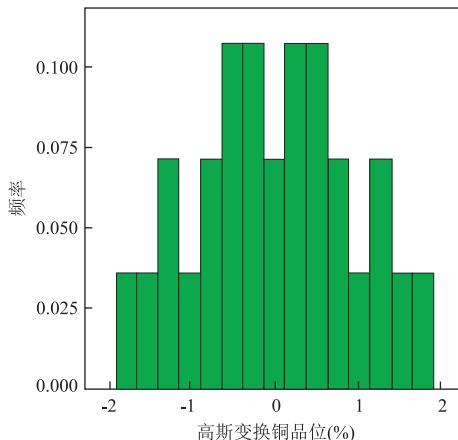


图 6 Cu12 矿体的高斯变换铜品位基本统计

Fig.6 Basic statistics of Gaussian Cu grade on Cu12 domain

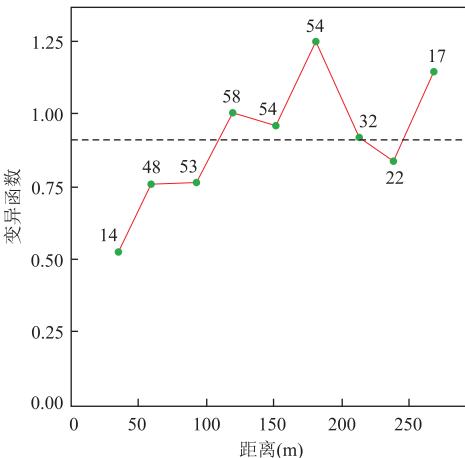


图 7 Cu12 整数据库组合样品试验变异函数

Fig.7 Downhole variogram on Gaussian value

函数(图 7);(3)利用样品高斯变换值在二维投影平面上构建试验变异函数,确定矿化的主轴与次轴方向;(4)建立样品高斯变换值理论变异函数模型

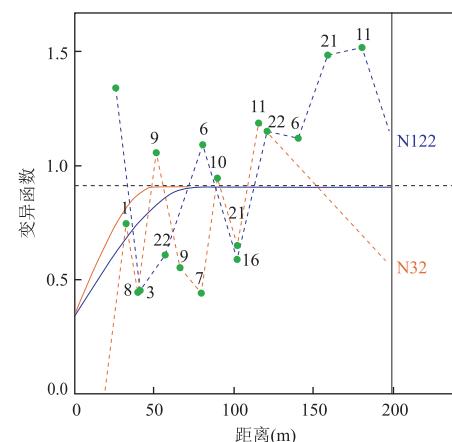


图 8 样品高斯变换值试验变异函数与理论变异函数

Fig.8 Variogram and variogram modeling for Gaussian value

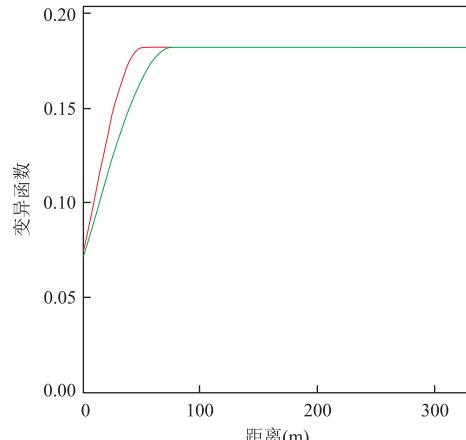


图 9 反变换的原始组合样品理论变异函数模型

Fig.9 Final variogram modeling on raw composites

(图 8);(5)样品高斯变换理论变异函数模型转原始变量理论变异函数模型;(6)最终构建 Cu12 矿体样品理论变异函数模型(图 9).

2.3 细脉型矿体模型的模拟

2.3.1 单层块体模型 针对细脉型矿体的模拟,二维网格模型转三维块体模型关键要素是建立根据厚度变化的单层块体模型.在本文中单层块体模型指根据细脉型矿体的厚度,在矿体厚度方向仅仅建立一层块体,且矿体厚度方向块体尺寸是根据矿体的厚度而变化.由于 Cu12 细脉型矿体呈近水平展布,矿体模型并未进行旋转,X 和 Y 方向块体尺寸选用 20 m,在 Z 方向块体尺寸选用最大尺寸为 7 m,最小厚度选用 1 m,Z 方向块体的层数为 1 层,最终该矿体的总模拟块数为 175 块.图 10 显示为单层块体模型模拟的矿体模型.

2.3.2 块体模型插值与转换 本次块体品位的赋值采用普通克里金法进行.普通克里金法是在矿产

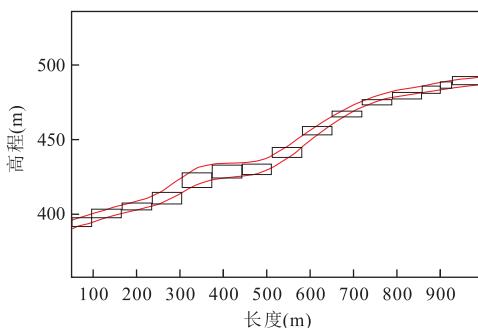


图 10 Cu12 矿体单层块体模型剖面

Fig.10 Cross section of single layer block model

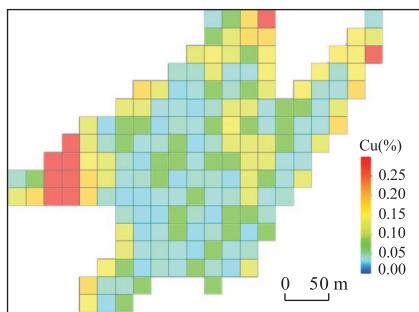


图 11 Cu12 矿体块体模型平面

Fig.11 Plan view of Cu12 single layer block model showing Cu grade variation

储量中应用最为广泛的地质统计学方法,在一定条件下适用于大量不同类型的矿床。在块体倾向投影平面上,采用普通克里金法对单层块体模型进行品位插值,结果如图 11 所示。

3 单层三维矿体模型应用讨论

细脉型矿体由于其矿体形态特殊性,在厚度方向样品数值较少且品位变化较大,如果运用传统的块体模型进行模拟,相对于样品间距可选择的块体模型在厚度方向会比较小,并且样品组合长度非常难以选择。这样的模型结果将导致大的块体与子块体之间的克里金插值过度平滑,并没有明显的品位变化,很难真实反映模型块体的品位变化特征。如果应用单纯的二维网格模型,又忽略了品位的空间变化特征,因此运用单层三维块体模型在模拟此类细脉型矿体具有十分重要的意义。总之,单层三维模型对比传统三维模型具有以下优势:(1)样品组合方面,简化了样品组合长度分析判定;(2)变异函数模拟方面,显著降低了样品的方差和块金值,提高了变异函数模拟的质量;(3)单层三维块体模型不仅避免

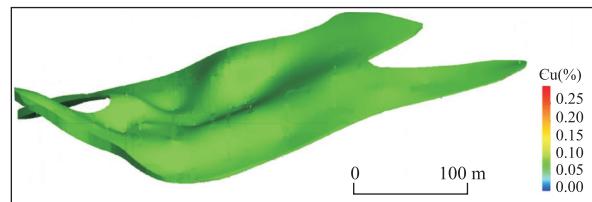


图 12 Cu12 矿体三维模型

Fig.12 Three-dimensional model of Cu12

了采用传统极小的子块模型匹配实体模型所产生的高平滑效应,还能够更加有助于实际采矿生产中块段划分。

新疆梅岭一红石铜矿区细脉状矿体厚度、品位变化较大,给探矿和开采带来了很大难度,大大增加了开发成本,特别是在矿产品价格不乐观的情况下,由于贫化率过大,只能舍弃。相对前人的二维地质数据表示方法,本文应用样品的高斯变换与反变换处理变异函数,对构建稳健的变异函数模型和合理地进行块体模拟提供了实践。三维地质模型(图 12)能够比较完整、准确、形象、立体地表达矿体的空间形态、品位变化,能够更加直观、准确地为采矿工程设计提供有效、合理的基础数据和资料,提高资源的利用率。

References

- Armstrong, M., 1984. Improving the Estimation and Modeling of the Variogram. In: Verly, G., David, M., Journel, A.G., et al., *Geostatistics for Natural Resources Characterization*. Springer, Dordrecht.
- Brooker, P. I., 1986. A Parametric Study of Robustness of Kriging Variance as a Function of Range and Relative Nugget Effect for a Spherical Semivariogram. *Mathematical Geology*, 18(5): 477–488. <https://doi.org/10.1007/bf00897500>
- Chen, X.W., Song, G.W., 2009. Application of Kriging Estimation Method in SURPAC Block Model. *Meatal Mine*, (10): 137–139 (in Chinese with English abstract).
- Coburn, T.C., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. *Technometrics*, 42 (4): 437–438. <https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10485733>
- Deng, X.H., Wang, J.B., Wang, Y.Y., et al., 2014. Geological Characteristics of the Hongshi Cu-Au Deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang and Discussion of the Deposit Genesis. *Mineral Exploration*, 5(2): 159–168 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z.Q., Fang, W.X., Hu, R.Z., et al., 2006. The Metallogenetic Environment of Kalatage Prophyry Copper

- (Gold) Deposit and Its Prospecting Perspective, Xinjiang, China. *Geological Journal*, 80(1): 90–100 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q. F., Liu, J. H., 2012. Application on the Disjunctive Kriging in Global Estimate of Recoverable Resource. *China Mining Magazine*, 21(8): 20–22 (in Chinese with English abstract).
- Hou, J. R., Huang, J. X., 2001. Application of Geostatistics in Classification for Resources/Reserves of Solid Fuels and Mineral Commodities. *Geology and Prospecting*, 37 (6): 61–66 (in Chinese with English abstract).
- Hou, J. R., Huang, J. X., Zhang, S. Q., 1989. Theory of Lognormal Kriging and Its Application in Ore Reserve Estimation. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 11(5): 391–398 (in Chinese with English abstract).
- Hou, J. R., Yin, Z. N., Li, W. M., 1988. Applied Geostatistics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hou, J. R., Yin, Z. N., Li, W. M., et al., 1998. Practical Geostatistics. Geological Publishing House, Beijing, 36–44 (in Chinese).
- Jia, M. T., Pan, C. L., Wang, L. G., 2003. The Technology to Overcome Effects of Subjective Factors in Deposit Modeling Using Geostatistics. *Geology and Prospecting*, 39(4): 73–77 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. R., Peng, P. G., Wang, L. G., 2016. Dynamic Cut-Off Grade Optimization in Shaxi Copper Mine. *Metal Mine*, (9): 73–77 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Q. G., Fang, T. H., Wang, J. B., et al., 2010. Geochronology Studies of the Early Paleozoic Honghai Massive Sulfide Deposits and Its Geological Significance in Kalatage Area, Eastern Tianshan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 3017–3026 (in Chinese with English abstract).
- Qin, K. Z., Fang, T. H., Wang, S. L., et al., 2014. Discovery of the Kalatage Cu-Au Mineralized District and Its Prospecting Potentiality, Paleozoic Window at the South Margin of the Tu-Ha Basin. *Chinese Geology*, 28(3): 16–23 (in Chinese).
- Sun, Y. J., Meng, W., Wan, H., 2006. A New Method for Classifying Degree of Engineering Controlling in Resources and Reserves Estimation. *Geology and Prospecting*, 42 (6): 81–84 (in Chinese with English abstract).
- Tang, P., Tang, J. X., Tang, X. Q., et al., 2013. The Comparative Research of Traditional Method and Geo-Statistics Method in Mineral Resource/Reserve Classification. *Metal Mine*, (11): 106–109 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. M., Hou, J. R., 1994. Cokriging and Its Application in Estimation of Mineral Reserves. *Geology and Prospecting*, 30(3): 39–48 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, B., Zhao, P. D., Hou, J. R., 2001. Theoretical Study of Universal Kriging in Temporal-Spatial Domain. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 23(1): 81–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X., Wang, X. W., Jin, Y., 2015. Reserves Estimation of an Iron Deposit Based on Geostatistics Method. *Metal Mine*, (7): 86–90 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈小文,宋革文,2009.克立格估值法在 SURPAC 块体建模中的应用.金属矿山,(10): 137–139.
- 邓小华,王京彬,王玉往,等,2014.东天山卡拉塔格红石铜矿地质特征及矿床成因初步探讨.矿产勘查,5(2): 159–168.
- 高珍权,方维萱,胡瑞忠,等,2006.新疆东天山卡拉塔格斑岩型铜(金)矿成矿地质背景与找矿评价.地质学报,80 (1): 90–100.
- 郭奇峰,刘金辉,2012.析取克里格法在可回采资源量的总体估算的应用.中国矿业,21(8): 20–22.
- 侯景儒,黄竞先,2001.地质统计学在固体矿产资源/储量分类中的应用.地质与勘探,37(6): 61–66.
- 侯景儒,黄竞先,张树泉,等,1989.对数正态克立格法理论及其应用.北京科技大学学报,11(5): 391–398.
- 侯景儒,尹镇南,李维明,1988.实用地质统计学.北京:地质出版社.
- 侯景儒,尹镇南,李维明,等,1998.实用地质统计学.北京:地质出版社,36–44.
- 贾明涛,潘长良,王李管,2003.克服地质统计学矿床建模中主观因素影响技术研究.地质与勘探,39(4): 73–77.
- 蒋成荣,彭平安,王李管,2016.沙溪铜矿开采边界品位动态优化方法.金属矿山,(9): 73–77.
- 毛启贵,方同辉,王京彬,等,2010.东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义.岩石学报,26(10): 3017–3026.
- 秦克章,方同辉,王书来,等,2001.吐哈盆地南缘古生代“天窗”卡拉塔格铜金矿化区的发现及其成矿潜力.中国地质,28(3): 16–23.
- 孙玉建,孟伟,万会,2006.矿产资源储量估算中工程控制程度划分的探索.地质与勘探,42(6): 81–84.
- 唐攀,唐菊兴,唐晓倩,等,2013.传统方法和地质统计学在矿产资源/储量分类中的对比分析.金属矿山,(11): 106–109.
- 王志民,侯景儒,1994.协同克立格法及其在矿产储量计算中的应用.地质与勘探,30(3): 39–48.
- 肖斌,赵鹏大,侯景儒,2001.时空泛克立格法的理论研究.江汉石油学院学报,23(1): 81–83.
- 周旋,王选问,金瑜,2015.基于地质统计学方法某铁矿资源量估算.金属矿山,(7): 86–90.