

各向异性矿化特征的分析与模拟 及其在储量估算中的应用

金毅^{1,2)}, 郑德顺¹⁾, 潘懋²⁾, 张璐¹⁾

1) 河南理工大学资源与环境学院, 河南焦作, 454000;

2) 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871

内容提要:矿化作用往往是地质事件及局部过程共同作用的结果,导致矿体空间形态复杂多变、矿石品位呈各向异性、尺度不一的非线性空间变异模式。传统方法无论是在矿石量的计算方面还是在矿块内平均品位的确定上都存在多种误差,并且无法实现信息的动态管理及直观表达。文章以安庆铜矿中心矿区为例,采用对数块 kriging 与三维地学模拟技术相结合的方法实现了储量的准确估算与动态管理。根据样品数据的空间构形引入虚拟钻孔,通过层位标定算法实现了矿体形态的近似模拟;以形态模型为约束,采用对数块 kriging 方法,在矿石品位变异特征分析结果的基础上,构建了品位三维属性模型,进而完成资源储量的准确计算。通过对不同方法估算结果的对比分析表明,对数块 kriging 方法相对于普通 kriging 方法及传统块段法而言具有明显的优势,并且随子块数量的增加精度呈增大趋势,但很快趋向稳定。文章最后利用可视化技术展示了三维地学模拟技术在矿山生产和开发过程中动态更新及决策支持的能力。

关键词: 三维地学模拟; 块 kriging 方法; 固体矿产资源; 地质属性模拟; 矿体形态模拟

统计表明,到2020年附近,41种非能源的主要固体矿产将无法实际的需求。因此为政府和决策部门提供有效、科学、精确的固体矿产资源的估算储量,并为生产部门提供矿产资源空间分布规律的定量描述就显得非常重要。然而长期以来,我国固体矿产储量评估采用的是以二维地质图件为基础的估算方法,如地质块段法、断面法、不平行断面法等。虽然这些传统方法的原理及操作都较简单,但其科学性和合理性却存在如下一些不足:①受品位及体积估算方法的影响明显,对于形态复杂、矿化不稳定的矿体,储量估算结果误差大(Pan et al., 2009);②因矿化过程以及富集贫化作用的影响,矿体品位往往表现出对数正态分布甚至分形的特征,采用线性平均加权的方法必然导致预测结果同真实情况之间的巨大偏差;③采用块内样本点的平均加权作为近似结果,是一种完全随机的假设,而矿化强度特征在空间上的变异是存在自相关性的;④无法衡量估

算结果的精度(侯景儒等,1993,2001),对估计结果的不确定性没有定量的描述;⑤传统方法无法直观、高效、精确地反映矿体的空间形态以及矿化强度的空间变异规律。

地质统计学是一种综合考虑地质变量的随机性和结构性(相关性)的方法体系(Journel et al., 1978)。它是最早由南非的采矿工程师 Krige 创立,后经 Mathron 的完善而逐步发展起来的一种线性局部最优无偏预测方法(Matheron et al., 1963)。正因如此,地质统计学模型在地质、环境、矿业等领域有着广泛的应用。

三维地学建模(3D Geoscience Modeling, 3DGMT)自提出后(Houlding, 1994),随着计算机技术的不断进步,其理论与方法日渐成熟。近年来,三维地学模拟技术在地质、矿山以及固体矿产资源储量估算等方面取得的成果与应用证明了该技术相对于二维方法的优势(徐云和等,2003;吴健生等,

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41102093, 40902033)和河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室开放基金项目(编号 OTMP0802)联合资助的成果。

收稿日期:2010-08-26;改回日期:2011-03-18;责任编辑:郝梓国,黄敏。

作者简介:金毅,男,1979年生。博士,河南理工大学讲师。主要从事数学地质,地学三维建模及成矿预测方面的研究。通讯地址:454003,河南省焦作市高新区世纪大道2001号河南理工大学资源环境学院;Email: jinyi2005@hpu.edu.cn。

DOI:CNKI:11-1951/P.20110907.1101.010 网络出版时间:2011-9-7 11:01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110907.1101.010.html>

2004;赵鹏大等,2004;包世泰等,2004;郑贵洲等,2004;朱良峰等,2006;刘海英等,2009;梁涛等,2010)。但这些应用多侧重于模拟技术本身,忽视了对地质现象或过程内在规律的探究。为此,本文将以3DGMT为信息表现手段,地质统计学模型为映射工具,利用安庆铜矿的实际勘探数据,来实现矿区矿产品位各向异性空间变异特征的分析 and 定量模拟,以便为政府及生产部门提供科学、高效、准确、直观的决策支持和生产指导。

1 研究区及地质勘探信息

安庆铜矿属大型铜、铁矿山,位于安徽省怀宁县月山镇北2.5km,矿区东段属铜陵市安庆铜矿郊区马鞍村,西段属怀宁县月山镇月石村。矿区地理坐标:东经116°55'55"~116°56'23",北纬30°37'4"~30°38'26"。总体可分为马头山矿段、中心矿区及东马鞍山矿段E1E2矿体3个作业区。本文研究区为

该矿中心矿区,由1号矿体与2号矿体组成(图1)。在研究区内,破碎带主要发育在月形山北坡南陵湖组地层中,为一组NW向张性破碎带,长250~300m,宽5~10m,最宽30m,倾向SW,倾角较陡,带内构造角砾岩发育,风化面具褐铁矿氧化壳。矿区还发育有矽卡岩接触带破碎带,该破碎带沿矽卡岩接触带普遍分布,其形成机制与岩体多期活动有关,是成矿的有利构造,钻孔中多有揭露。在南接触带岩体一侧存在出露宽度数米至百余米的构造蚀变带,带内常见岩石碎裂结构,局部可见角砾岩及强碳酸盐化、高岭土化、硅化闪长岩。区内主要有两个岩体分布,东部为总铺闪长岩体,西部为月山闪长岩体,为矿床成矿母岩(图1)。本区脉岩发育,以中基性岩脉为主。煌斑岩脉、闪长玢岩脉、角闪闪长岩岩脉、辉绿岩脉及少量角闪闪长玢岩脉共存,其中煌斑岩脉广泛分布。岩脉规模一般较小,长数十米,少数可达数百米,一般宽1~10m,多为成矿后岩脉。同

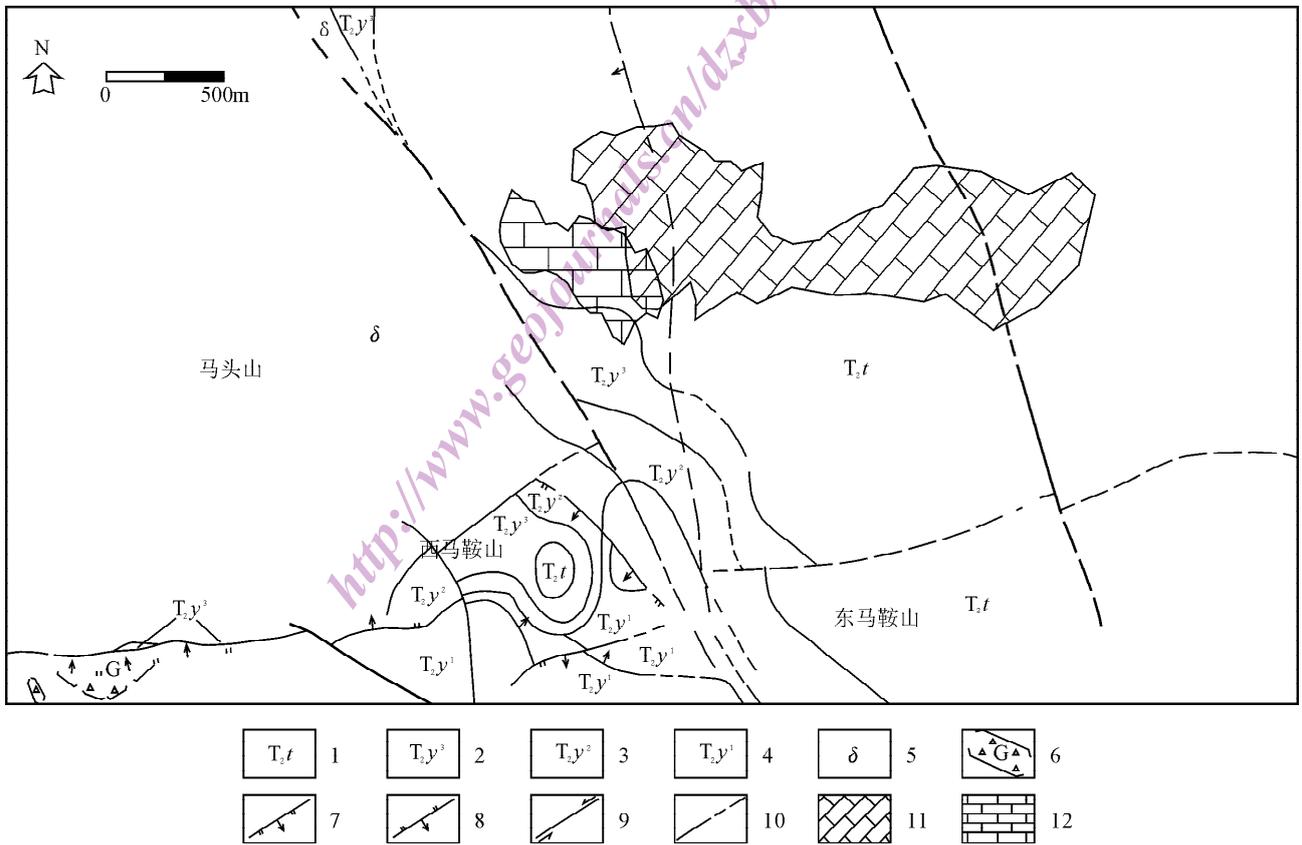


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geology of the study area

1—铜头尖组;2—月山组第三段;3—月山组第二段;4—月山组第一段;5—闪长岩;6—破碎带;7—实测正断层;
8—实测逆断层;9—实测平行断层;10—实测及推断断层;11—一号矿体;12—二号矿体

1—Tongtoujian Formation; 2—upper Yueshan Formation; 3—middle Yueshan Formation; 4—lower Yueshan Formation; 5—diorite; 6—fracture zone; 7—measuring normal fault; 8—measuring revers fault; 9—measuring parallel fault; 10—measuring and indicated fault; 11—1# orebody; 12—2# orebody

时矿石类型都以含铜矽卡岩、含铜磁铁矿、磁铁矿及含铜闪长岩为主。矿石结构都以结晶结构、交代溶蚀结构、固溶体分离结构为主,构造以浸染状、条带状、块状构造为主,物质成份以黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿为主。

为了探明研究区复杂矿体空间形态及各向异性空间矿化变异特征,本文收集了研究区域钻孔数据 184 个,样品数据 3723 个(图 4a)。

2 理论及方法

2.1 区域化变量及空间相关性模型

所谓区域化变量是指以空间点 X 的 3 个直角坐标 x_u, x_v, x_w 为自变量的随机场 $Z(x_u, x_v, x_w) = Z(x)$ 。地质统计学是基于区域化变量理论的一种空间预测方法,该理论认为在一给定的研究空间内,区域化变量虽然具有随机变量的特征,但存在一定的空间相关性,即结构特征,其结果由三部分组成(Burrough et al., 1998),如式(1)

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) + \varepsilon' \quad (1)$$

μ 为确定性部分,独立于空间的一个常量或是同 x 之间有确定的数学关系; $\varepsilon(x_i)$ 则为空间相关部分; ε' 随机变异,被认为是一种完全随机的,是独立于空间的噪声。

空间相关性是对不同空间位置上属性值依赖程度的一种统计规律。如果认为某一位置的属性值是所谓的区域化变量的一个实现,那么空间相关程度的度量可以由一种称为变异函数的数学模型计算获得,其中变异函数的数学模型如式(2)(Journel et al., 1978)

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x+h))^2] \quad (2)$$

式中 $\gamma(x, h)$ 是分隔点 $x, x+h$ 的向量 h 的函数, E 为期望。变异函数度量的是 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 之间的变异强度的大小,同方向无关。在二阶平稳假设条件下,变异函数式成为了一个独立于 x , 仅同 h 相关的函数。这是地质统计学模型对区域化变量的一种更高级别的假设。该函数已广泛应用于结构分析以及地质统计学插值模型中。并广泛用于资源量的计算及评估中。

在具体应用中,变异函数的计算常采用一种基于统计特征的二阶矩的计算方法(式 3)。也即实验变异函数:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{N(h)} (Z(x) - Z(x+h))^2 \quad (3)$$

式中 $N(h)$ 是 $(x, x+h)$ 区间的点对数量。其中一隐含的假设就是变异值的计算只同点对间的距离有关,而与具体的位置无关,这就是空间变异理论的平稳假设,或叫做二阶平稳(Webster et al., 2007)。

Kriging 方程组的有效求解则要求变异函数具有单调递增、非负定以及连续等特征,因而要将实验变异函数拟合为一种有效的数学模型,并作为全局的自相关规律,该模型就称为理论模型。常见的理论模型有球面、指数、高斯模型等,这些基本模型由块金(C_0)、基台(C)和变程(a)三个参数以及一个数学函数共同确定(Deutsch et al., 1998)。

区域化变量往往是外部因素及内部过程共同作用的最终结果,表现出方向及尺度上不同的变异特征,这称为各向异性的变异。对于这种复杂的结构特征的分析,可以通过计算不同方向的实验变异函数来发掘;同时在指定的方向下,通过设定不同尺度的 h 来探究其组合变异特征。根据变异参数的差别,各向异性模型分为几何各向异性和带状各向异性。前者的特点是不同方向变异函数具有相同的结构形状和变异特征(基台+块金)和不同的空间相关强度(变程);带状各向异性在不同的方向上会表现出基台值的不同(Deutsch, 2002)。

2.2 空间预测方法

作为地质统计学基础方法,普通克里格(OK)方法进行局部估计的关键是要解决两个问题:一是克里格方程组设计及各邻域克里格权重系数 λ_i 的计算;二是定量描述最小估计误差—克里格方差 δ_{OK}^2 。为了达到估值结果无偏及目标估计最优的条件,可建如式(4)的 kriging 方程组

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu &= \gamma(x_i, x_0), i=1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\gamma(x_i, x_j)$ 代表向量 $\overline{x_i x_j}$ 的变异值,式(5)是其矩阵形式

$$A\lambda = b \quad (5)$$

解方程组(5),得权重系数 λ

$$\lambda = A^{-1}b \quad (6)$$

继而得点 x_0 的估计值以及 kriging 方差(式 7 和 8)

$$Z_{OK}^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

$$\delta_{OK}^2 = M^T \lambda \quad (8)$$

其中 δ_{OK} 越小,代表预测的结果越可靠,它是对预测结果准确性的一种定量评价。

在利用 OK 进行空间预测时,要求数据满足或基本满足正态分布特征。然而矿体品位的分布往往表现出对数正态分布以及严重托尾的分形特征(Cheng Qiuming, 1999)。为了能利用 kriging 方法来处理具有对数正态分布特征的这类数据,衍生出对数正态 kriging(LK)方法。相对于 OK 而言,LK 的基本思路如下:

① 将原始数据进行对数转换,得新数据集,记为 $Y(x)$;

$$Y(x) = \lg(Z(x)) \quad (9)$$

② 以 $Y(x)$ 为区域化变量,进行空间变异结构分析,得 $\gamma_{\lg}(h)$,同样是在无偏及目标最优的前提下,通过 OK 方程组(4)的建立,求得 x_0 的预测值 Y_{OK}^* 、方差 δ_{OK}^2 及拉格朗日乘子 μ ;

③ 利用式(10)确定 $Z_{LK}^*(x_0)$ (Crow et al., 1988)

$$Z_{LK}^*(x_0) = \exp[Y_{OK}^*(x_0) + \delta_{OK}^2/2 - \mu] \quad (10)$$

在储量估算过程中,采用矿体内某一点的估计值作为矿块的平均品位,显然存在着误差,并且这种误差随块体尺寸的变大呈递增趋势。为了提高估计结果的精度,对待估单元进行再次剖分,分别对各子单元进行估值,将其平均值作为目标块的品位,这必然会提高整个估测的精度并降低不确定性。基于上述思想的预测模型即为块 kriging (BK),同点 kriging(PK)相比,BK 预测结果更加合理,且降低了 kriging 方差。

BK 预测方程组不同于 PK,反映在目标向量 b 的构建上。即 b 中的分量 $\gamma(x_i, x_0)$ 由 x_i 同块之间的变异统计平均值 $\bar{\gamma}(x_i, B)$ 代替, $\gamma(x_i, B)$ 的计算见式(11)

$$\gamma(x_i, B) = \frac{1}{|B|} \int_{x_j \in B} \gamma(x_i, x_j) dx_j \quad (11)$$

式中 $|B|$ 为待估单元的几何测度,即面积(二维)或体积(三维), x_j 为各次分单元, dx_j 为第 j 子单元的面积或体积, x_i 为样品数据。求解计算得 $Z_{OK}^*(B)$ 及 δ_{OK}^2 的计算方法同式(7)和式(8)。

综合式 10 和 11,可得对数块 kriging 预测公式为 $Z_{LK}^*(B) = \exp[Y_{OK}^*(B) + \delta_{OK}^2/2 - \mu]$ (12)

2.3 三维地质属性模拟

三维地质属性模拟是集计算机图形学、数学、地质知识及科学计算可视化于一体,致力于理解和认识地质属性的空间变异特征,实现地质现象和规律的信息化、可视化和定量化的一种地学信息处理方法。其关键是建立空间域同属性域之间的映射关系

模型。数学定义为:已知一个地理空间 Ω 的子集 S , 以及一个 S 到属性空间 F 的子集 Z 的映射 $m: x \rightarrow y$ ($x \in S, z \in Z$),其中 Z 为即属性样本模型,属性模拟就是通过 m 建立起一个 Ω 到 F 的映射 $M: x \rightarrow y$ ($x \in \Omega, y \in F$)的过程(姚凌青, 2008^[9])。

3 结果及应用

3.1 矿体品位统计特征

统计分析收集的 3723 个样品数据,发现存在严重的偏倚,不符合正态分布特征。经对数转换,偏度明显降低,并且基本满足正态分布特征(见图 2 及表 1)。

表 1 原始数据及对数转换后的基本统计特征

Table 1 Statistic summaries of raw data and the data after logarithmic transformation

统计参数	Cu	$\log_{10} Cu$
平均	0.802077	-0.56102
标准误差	0.018582	0.012497
中位数	0.367	-0.43533
标准差	1.139045165	0.762552
方差	1.297423889	0.581486
峰度	10.12618097	-0.06432
偏度	2.723482784	-0.59353
最小值	0.001	-3
最大值	10.08	1.003461
观测数	3723	3723

3.2 空间变异模式

3.2.1 变异结构分析

为了探究 $\log_{10} Cu$ 在不同方向、尺度上的变异特征,结合矿体的走势,分析了东西、南北以及纵深三个方向的变异结构,并分别以 1~12m 不同滞后距计算了各方向上变异函数。结果呈现出水平面上南北及东西方向空间相关性强而垂向上相关性弱的特点。对比分析拟合结果,选取东西方向滞后距为 12m、南北方向 8m、垂向 2m 的结果作为不同方向上结构分析的实验模型,并以指数模型对各实验变异函数进行了拟合(图 3,模型的参数见表 2),其结果呈带状各向异性变异特点。

3.2.2 有效性验证

利用 kriging 进行空间预测时,变异函数决定着预测结果的有效性和真实性(金毅等, 2009)。根据空间变异结构分析结果,采用金毅等(2010)提出的统一套合模型,对样本数据进行全局交叉验证。经线性统计分析,得 $Z_{LK}(x) = 0.936Z(x)$,相关系数

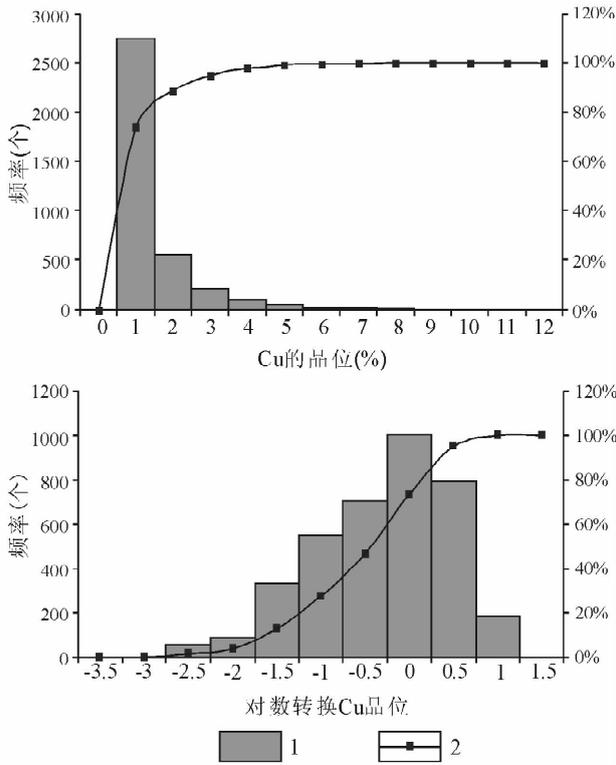


图 2 原始及对数转换后的频率统计直方图

Fig.2 Frequency histograms of raw data and that after logarithm transformation

1—频率;2—累积概率分布曲线

1—Frequency;2—accumulation probability distribution curve

$R^2 = 0.987$ 。其中 $Z_{LK}(x)$, $Z(x)$ 分别为预测值和实际值,而 R^2 为拟合优度决定系数。这表明了变异结构特征分析的合理性和有效性。

表 2 不同方向的拟合变异函数及变异参数

Table 2 Fitted variogram models of different directions and their parameters

方向	块金	变程(m)	基台
东西	1.0	110	3.1
南北	1.5	150	3.3
上下	1.5	36	2.65

3.3 三维矿体模型

3.3.1 矿体形态模型

矿体形态圈定方法种类较多,其中,轮廓线法是一种常用的圈定手段(朱良峰等,2006)。但因所研究的中心矿区地质条件异常复杂,轮廓线获取困难。为此,本文采用一种近似但高效的方法来勾勒矿体的边界,其基本原理为:①将样品数据在水平方向依次分割为连续的块单元,记这些区域为 $Spa[i]$

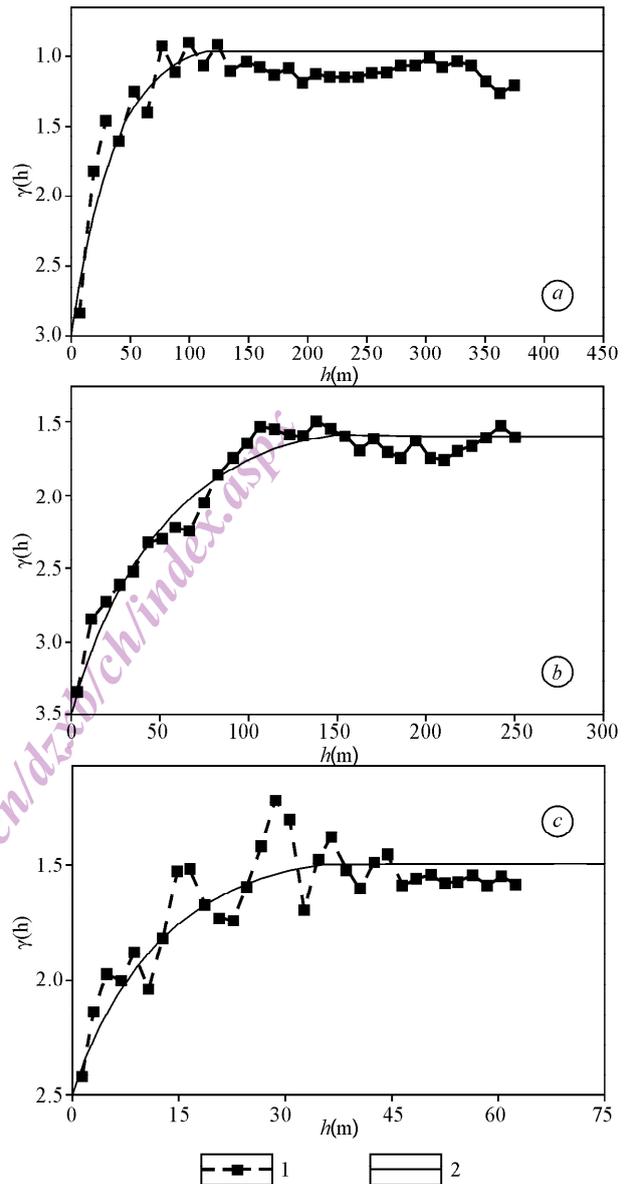


图 3 实验变异函数及其拟合模型

Fig.3 Experimental variograms and their fitted models

(a)—东西方向变异函数;(b)—南北方向变异函数;

(c)—上下方向变异函数;1—实验变异函数;2—拟合模型
(a)—Variograms of east-west direction; (b)—variograms of south-north direction; (c)—variograms of upright direction; 1—experimental variogram; 2—fitted model

$[j]$,其水平中心坐标为 $cenPt[i][j]$;②计算 $Spa[i][j]$ 所有样品数据 Z 坐标的最小值和最大值,记为 Z_{min} 和 Z_{max} (如果当前区域无样本,则不处理);③生成虚拟钻孔 $vDrill[i][j]$,其水平坐标为 $cenPt[i][j]$,钻孔 Z 轴顶、底点坐标值依次为 Z_{max} 和 Z_{min} ;④基于虚拟钻孔,采用钻孔地层解译的方法完成矿体形态模型的构建(明镜等,2009)。中心矿区矿体形态模型的构建过程见图 4。

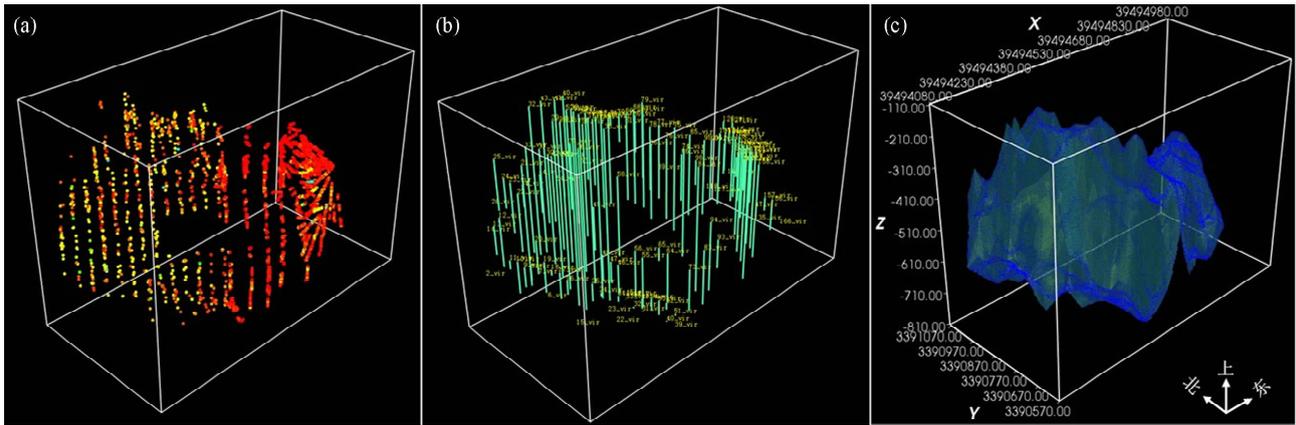


图4 基于离散样品数据的矿体形态模型的生成

Fig. 4 The modeling process of ore body structural model

(a)—实际样品数据;(b)—由样品数据生成的虚拟钻孔;(c)—基于虚拟钻孔生成的矿体形态模型

(a)—Actual samples; (b)—virtual drills from samples; (c)—ore body's shape model constructed from virtual drills

3.3.2 矿体品位属性模型

根据矿体的实际尺寸,将中心矿区按 128 的分辨率进行剖分,生成矿块模型。继而以对数 kriging 方法为映射模型,实现 Cu 品位属性模型的构建。为了对比分析不同分辨率的次分块对总体预测结果的影响,本文分别采用了 $1 \times 1 \times 1$ 、 $2 \times 2 \times 2$ 、 \dots 及 $8 \times 8 \times 8$ 的子块分辨率,构建了不同矿体品位属性模型。结果发现,当次分块分辨率不断增大时,预测结果有较大的变化,主要反映在局部的波动逐渐降低,同时相应的 kriging 方差减少。但当分辨率超过 $4 \times 4 \times 4$ 后,预测结果及 kriging 方差基本趋向于稳定。出现上述结果的原因可能是块金效应所致,因为块金形成的原因主要来自于系统误差以及更小尺度变异特征的综合结果。其中点 kriging(即 $1 \times 1 \times 1$ 分辨率)及 $4 \times 4 \times 4$ 分辨率的块 kriging 的模拟结果品位属性模型如图 5 所示。

3.4 储量估算结果对比分析

为验证本文方法的科学性和先进性,分别以普通 kriging、传统块断法以及对数块 kriging 方法对 Cu 储量进行估算,各自结果同真实数据的相对误差列于表 3,其中对数 kriging 包含不同分辨率的块剖分结果(分别为 $1 \times 1 \times 1$ 、 $2 \times 2 \times 2$ 到 $5 \times 5 \times 5$)。

表 3 不同方法计算结果

Table 3 Estimated reserve using different approach

采用的方法	相对误差(不同方法计算结果/真实储量,%)
传统块断法	86.3
普通 kriging	91.6
对数 kriging	102.3、98.8、96.7、96.5、96.4

由表 3 可知,相对于传统方法而言 kriging 方法的估算更接近于真实结果,普通 kriging 方法计算的结果比实际 Cu 储量低,这主要是因为加权压缩以及数据对数正态分布的原因所致。同时由表 3 可知,不同块分辨率对预测结果有较大的影响,但是随着剖分次数不断增加,预测结果趋于稳定;当矿体品位的分布表现出对数正态分布以及严重托尾特征时,对数 kriging 比普通 kriging 更能有效描述地质变量的空间变异规律。

3.5 动态管理及决策支持

在实际生产过程中,准确、直观的信息尤为重要。利用三维地学模拟技术及信息的直观三维可视化表征,地质工作者和决策层能方便地利用不同的指标体系对矿体当前可采边界进行动态圈定,进而为矿山的设计、勘探开发提供优化指导和决策支持。如,在近期由于矿石价格波动,矿产勘探开发公司和部门评估矿产资源的工业指标也要做相应的调整,这将直接改变原来的可开采的矿体边界及空间构型。传统方法很难实现这种动态计算和再评估,而三维地学模拟及可视化技术在矿山动态管理方面具有绝对的优势。图 6 展示了利用不同边界品位动态提取新矿体边界的过程。

4 结论与讨论

本文通过对安庆铜矿各向异性矿化特征的分析与模拟,取得如下几点认识:

(1) 在矿产资源储量评价中,采用三维地学模拟技术来构建矿体品位模型具有直观、精确、高效等优点,不但可以真实反映矿体的空间形态和展布特

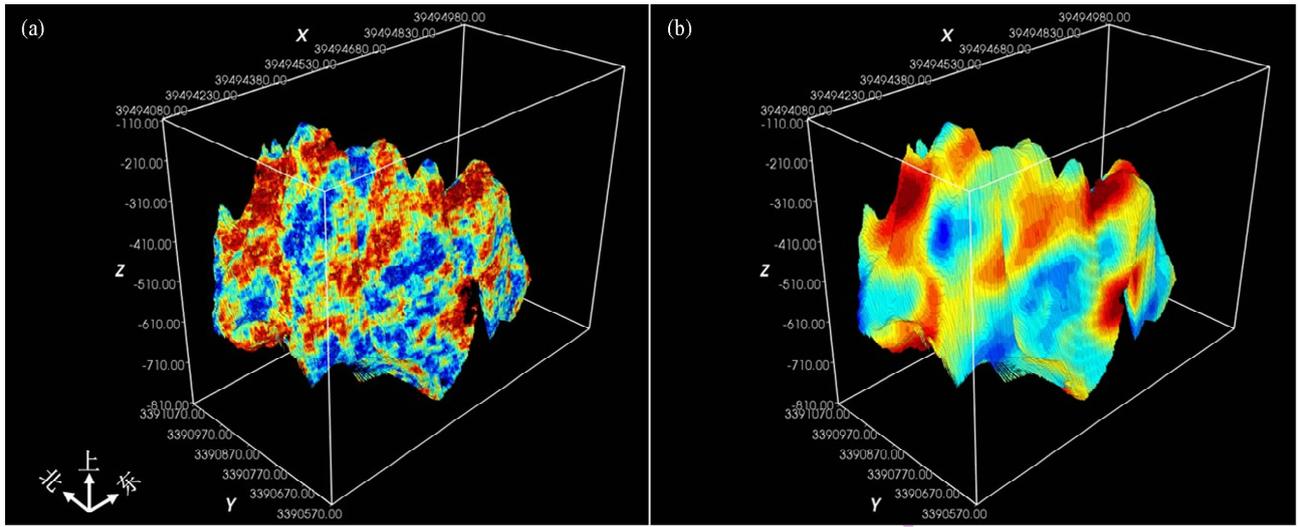


图 5 三维矿体品位属性模型

Fig. 5 3-D property model of copper grade

(a)一点对数 kriging 模型;(b)4×4×4 块对数 kriging 模型

(a)—Model generated by lognormal punctual kriging; (b)—model generated by lognormal block kriging (4×4×4)

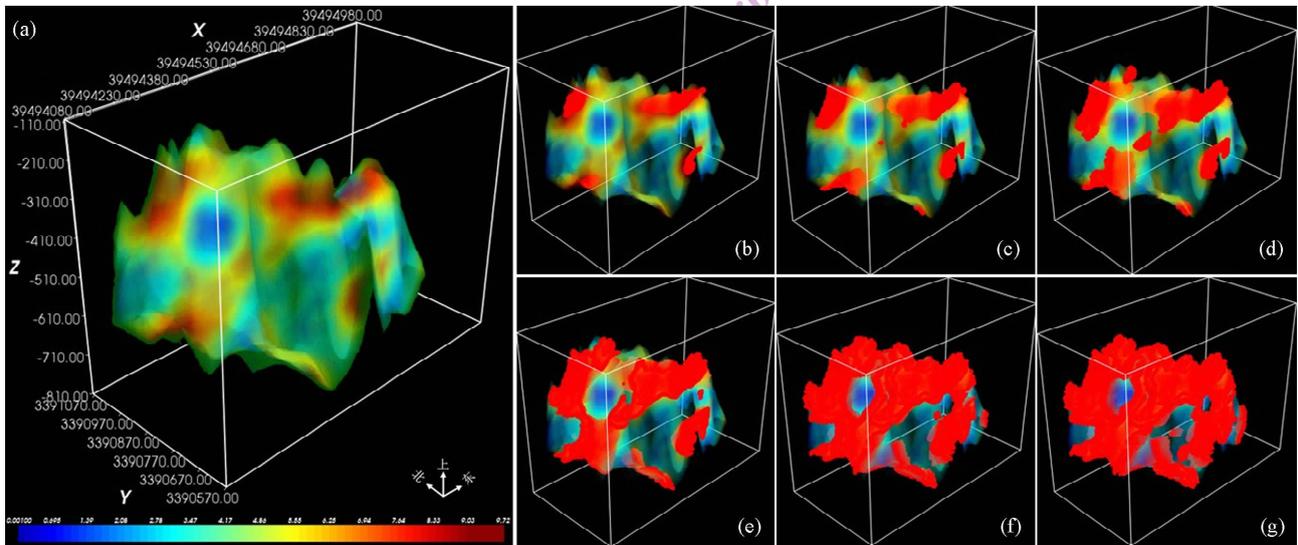


图 6 基于不同边界品位矿体边界的提取,其中红色为大于该边界品位的矿体

Fig. 6 Extraction of ore body by different cut-off, the red part is the part with its average grade is above the cut-off

(a)—矿体品位属性模型;(b)→>9%;(c)→>8%;(d)→>7%;(e)→>6%;(f)→>5%;(g)→>4%

(a)—Ore body grade property model; (b)→>9%; (c)→>8%; (d)→>7%; (e)→>6%; (f)→>5%; (g)→>4%

征,而且还能定量描述矿化强弱的空间变异规律;

(2) 相对传统计算方法而言,利用地质统计学模型来计算固体矿产资源储量更科学合理,因为它兼顾了结构和局部随机特征,同时变异函数在发掘不同方向、不同尺度下的变异规律,是任何其它预测模型所不具备的;

(3) 相对于点 kriging 方法而言,块 kriging 方法的估值结果更准确,同时降低了预测方差;

(4) 展示了三维地学模拟技术的动态计算、管

理及直观信息表达能力,这为矿山生产、开发提供了准确、快速的决策支持和优化指导。

但是,本文的研究也存在不足,主要反映在局部奇异性这一部分。因为成矿、富集以及贫化过程是一种多重迭代的结果,往往表现出一种尺度特征,即分形或多重分形现象,而这种变异在地质统计学预测模型中无法体现。因此,在贵重矿产资源储量估算中,除了要考虑本文所描述的空间相关变异特征,还应考虑尺度特征,即局部奇异性特征。最终通过

二者的融合来提高预测精度。

注 释

① 姚凌青. 2008. 基于地质统计学的三维属性建模方法研究. 北京: 北京大学博士学位论文.

参 考 文 献

包世泰, 夏斌, 崔学军, 黎华. 2004. 地质三维信息模型研究及其应用. 大地构造与成矿学, 28(4):470~476.

侯景儒, 郭光裕. 1993. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用. 北京: 冶金工业出版社.

侯景儒, 黄竞选. 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.

金毅, 潘懋, 姚凌青, 马翀. 2009. 一种稳健变异函数计算方法. 北京大学学报: 自然科学版, 45(6):1033~1038.

金毅, 潘懋, 马翀. 2010. 地质变量变异函数统一套合方法的原理及验证. 中国矿业大学学报, 39(3):420~425.

梁涛, 陆树文, 罗照华, 樊秉鸿, 胡瑞刚, 杨宗锋. 2010. 安妥岭铅矿体线框模型和矿块模型的初步建立. 地质与勘探, 46(3):0553~0560.

刘海英, 刘修国, 李超岭. 2009. 基于地质统计学法的三维储量估算系统研究与应用. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3):541~546.

明镜, 潘懋. 2009. 基于层位标定的钻孔数据快速解译. 岩土工程学报, 31(5):692~698.

吴健生, 朱谷昌, 曾新平, 张普斌, 和志军. 2004. 三维 GIS 技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用. 地质与勘探, 40(1):68~72.

徐云和, 赵吉先, 程朋根, 陈红华. 2003. 地矿 3 维 GIS 模型的构建及可视化. 中国矿业, 12(4):60~62.

赵鹏大, 张寿庭, 陈建平. 2004. 危机矿山可接替资源预测评价若

干问题探讨. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(2):111~117.

郑贵洲, 申永利. 2004. 地质特征三维分析及三维地质模拟现状研究. 地球科学进展, 19(2):218~223.

朱良峰, 潘信, 吴信才. 2006. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发. 岩土力学, 27(5):828~832.

Burrough P A, McDonnell R A. 1998. Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems and Geostatistics). New York: Oxford University Press.

Cheng Qiuming. 1999. Multifractality and spatial statistics. Computer & Geoscience, 25(9):949~961.

Crow E L, Shimizu K. 1988. Lognormal Distributions: Theory and Applications. New York: Marcel Dekker Press.

Deutsch C V, Journel A G. 1998. GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. 2nd ed. New York: Oxford University Press.

Deutsch C V. Geostatistical Reservoir Modeling. 2002. New York: Oxford University Press, 124~152.

Houlding S W. 1994. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization. Berlin: Springer Verlag.

Journel A G, Huijbregts C J. 1978. Mining geostatistics. San Diego: Academic Press.

Matheron G. Principles of Geostatistics. 1963. Economic Geology, 58(8):1246~1266.

Pan Mao, Li Jun, Wang Zhan-gang, Jin Jiangjun. 2009. Application of 3-D Geoscience Modeling Technology for Estimation Solid Mineral Reserves. ACTA GEOLOGICA SINICA, 83(3):655~600.

Webster R, Oliver M A. Geostatistics for Environmental Scientists. 2007. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

3D Geological Modeling of Anisotropic Mineralization and Its Application in Reserves Estimation

JIN Yi^{1, 2)}, ZHENG Deshun¹⁾, PAN Mao²⁾, ZHANG Lu¹⁾

1) *School of Resources and Environment Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000;*

2) *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Education Ministry, Peking University, Beijing, 100871*

Abstract

Mineralization is often considered as an integrated result of geological events and local processes, both of which produce the nonlinear space variation mode displaying morphological complexity, varied grades, and sizes of orebodies. Conventional methods of resource estimation have deviation on both calculation of ore reserves and average grade of ores, and fail to realize instant management and visualization for real-time data. Taking the central ore zone of Anqing copper deposit as an example, this study realized the precise estimation and real-time management for ore reserves using lognormal block Kriging method and 3D geological modeling. Based on spatial configuration of the samples, virtual boreholes were introduced to approximately simulate orebody shapes using stratum tagging algorithm. With restriction of morphological model in association with the variant features of ore grades, the lognormal block Kriging method was employed to build 3D property model of grade so as to improve precise assessment of ore reserves. Comparative analyses for the reserves data evaluated by different methods show that, relative to the common Kriging method and conventional block method, the lognormal block Kriging method has obvious advantages and its precision increases with increasing number of sub-blocks but tends to stable soon. At last, the study took use of visualization technology to display ability of the 3-D geological modeling technology in instant updating and decision making during mine production and development.

Key words: 3-D geological modeling; block Kriging method; solid mineral resources; geological property modeling; morphological modeling of ore body