

## 地质统计学在羊拉铜矿储量计算中的应用

余海军<sup>1)</sup>, 李文昌<sup>1,2)</sup>, 曾普胜<sup>3)</sup>, 尹光候<sup>1)</sup>

1)云南省地质调查局, 云南昆明 650051; 2)昆明理工大学, 云南昆明 650093;

3)中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 100025

**摘要:** 本文以云南德钦羊拉铜矿床为例, 借助 Surpac 矿业软件建立了矿床地质数据库, 并运用地质统计学的方法, 通过分析羊拉 5 号矿体铜品位分布规律, 计算出了厚度、倾向、走向 3 个方向的实验变异函数, 并进行了理论变异函数的曲线拟合, 确立了矿床的数学模型。在此基础上运用克里格法和距离平方反比法分别进行了储量计算, 再结合传统的块段法计算出的储量, 将三者进行对比分析, 探讨了三种方法的影响因素及其产生误差的根本原因, 最后认为运用克里格法计算储量具有先进性和使用性。文章还分析了铜矿体的品位-吨位曲线图, 为矿山合理确定经济品位和吨位提供了可靠的理论依据。

**关键词:** SURPAC 软件, 地质统计学, 储量计算, 羊拉铜矿

中图分类号: P628.2;P624.7 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)05-684-07

## The Application of Geostatistics to Ore Reserve Calculation of the Yangla Copper Deposit

YU Hai-jun<sup>1)</sup>, LI Wen-chang<sup>1,2)</sup>, ZENG Pu-sheng<sup>3)</sup>, YIN Guang-hou<sup>1)</sup>

1) Yunnan Bureau of Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051;

2) Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093;

3) Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025

**Abstract:** With Surpac software, this paper established a geological database for the Yangla copper deposit. The experimental variation function was calculated in three directions (thickness, dip and strike). Through employing the method of geostatistics, making an analysis of the copper grade of the 5th ore body, and conducting curve fitting of the theoretical variable function, the authors established a mathematical model for the Yangla ore deposit. On such a basis, the reserves were calculated by using the Kriging and the inverse square distance methods. In combination with the statistics of reserves calculated by the traditional block method, the three methods were compared with each other. The impact factors of the three methods and the fundamental causes for their errors were discussed. It is found that the Kriging method for reserves calculation is the most advanced and applicable means. This paper has also analyzed the copper grade - tonnage curves for the ore body, and the result can provide a reliable theoretical basis for reasonable determination of economic grade and tonnage in the mine.

**Key words:** Surpac software; geostatistics; reserves calculation; Yangla copper deposit

地质统计学是 20 世纪 60、70 年代发展起来的集数学、地质、采矿为一体的新兴边缘学科(初道忠等, 2006; 尚小明等, 2007), 以区域化变量理论为基

础, 以变异函数为主要工具, 是目前西方各国地质学和矿业界非常通行的一种地质研究和储量计算方法, 具有传统地质学方法所无可比拟的优越性(冯超

本文由国家科技支撑计划项目(编号: 2006BAB01A07)资助。

收稿日期: 2009-05-10; 改回日期: 2009-10-10。

第一作者简介: 余海军, 男, 1985 年生。硕士研究生。研究方向: 矿床学、成矿规律与成矿预测。通讯地址: 650051, 云南省昆明市东风东路东风巷 87 号地矿大厦。电话: 0871-3164685。E-mail: yhj307@163.com。

东等, 2007)。Surpac 软件是由澳大利亚 SSI 公司开发的大型矿山工程软件, 目前广泛运用于地质勘探、测量、采矿设计及土地复垦等。文章利用 Surpac 软件, 统计分析了羊拉铜矿品位分布情况, 同时运用地质统计学的方法进行了储量计算, 结果发现, 所建模型可靠, 计算结果准确, 这主要是由于地质统计学方法即考虑了距离的因素, 同时也考虑了变程的因素, 也就是说还考虑了样品的空间上的位置关系, 并不完全是均化的表现。

### 1 矿床地质概况

德钦羊拉铜矿床位于印度板块与欧亚板块之间的古特提斯构造域, 大地构造位置属扬子陆块西侧的中咱地块西部边缘, 其西侧与昌都—思茅地块相邻, 金沙江板块结合带穿过矿区。矿区断层较发育, 除区域性的金沙江(等)深大断裂外, 主要有斜穿矿区中部的北东向断层  $F_4$ , 近北东向平移断层  $F_6$ 、 $F_8$ 、 $F_{10}$  及层间破碎带。区内岩浆岩分布较广, 喷出岩由基性—中基性的角闪安山岩、玄武岩等组成。侵入岩主要为印支期的中酸性侵入岩(潘家永等, 2000;

魏君奇等, 2004; 林仕良等, 2004)。

本文研究主要针对里农矿段 5 号矿体, 5 号矿体产于江边组中段( $D_{1j}^2$ )与上段( $D_{1j}^3$ ), 矿体倾向北西, 倾角较缓, 一般  $8^\circ$ - $18^\circ$ , 倾斜延伸 100 m 左右尖灭。矿体出露标高 3090—3250 m, 共 41 个工程控制, 控制矿体长 1613 m, 控制矿体斜深 60—320 m。矿体呈层状、似层状、透镜状产出, 无分枝复合现象(图 1), 矿体最大厚度 29.09 m, 平均 9.87 m。矿石类型主要以块状硫化物为主。

### 2 模型建立及分析研究

矿床数学模型的研究建立, 是整个数字矿床的核心内容, 建立的正确与否, 直接关系到下一步储量计算的正确性。本次工作主要运用地质统计学的方法进行研究分析。

#### 2.1 建立地质数据库

为建立羊拉铜矿床 5 号矿体地质数据库, 收集了矿山目前所有的勘探工程数据, 笔者利用“羊拉铜矿首采区地质勘探报告”中的 66 个地表钻、36 个坑内钻、22 条平硐、25 条探槽、24 张勘探线剖

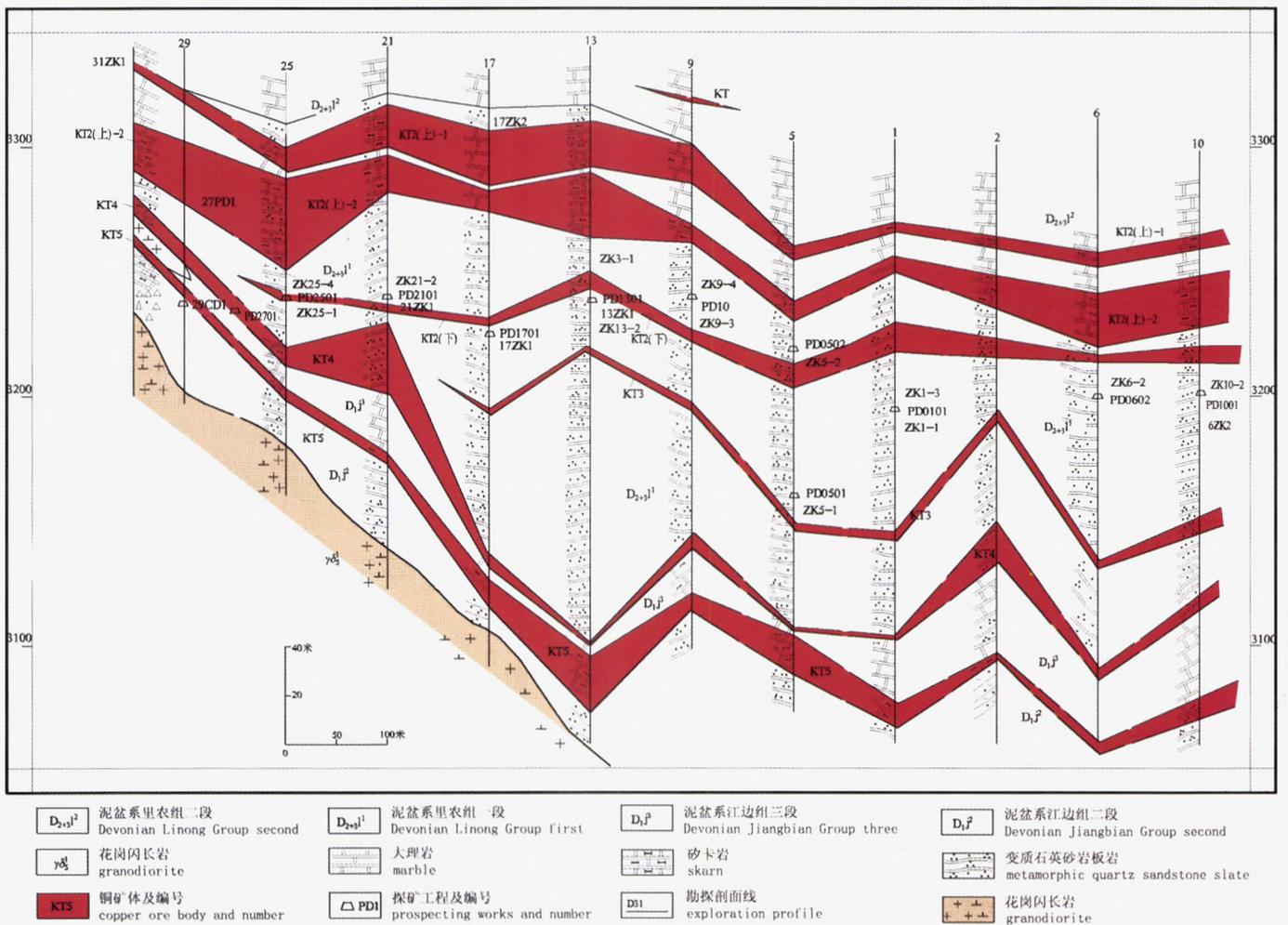


图 1 里农矿体剖面对比图  
Fig. 1 Columnar correlation of Linong ore bodies

面图以及部分野外实际观测资料, 共计 7340 件样品, 后来经过优选, 删除了不必要的和 5 号矿体外部的钻孔数据, 剩余 146 件样品。同时进行了如下有效性检验: ①样品重叠检验; ②测斜深度、取样深度、岩性深度超出终孔深度检验; ③三维视图对勘查工程的数据校验。

### 2.2 数据的统计分析

为了确保得到各参数的无偏估计量, 地质统计学要求有效数据必须在固定长度的支撑上, 即同一类的参数的样品段的长度应该一致(邓明国等, 2006)。因此, 模型品位计算之前必须对样长不等的钻孔数据按一定的长度进行组合计算并进行分析对原始数据进行等长处理。在组合过程中, 我们根据羊拉矿床钻孔的特点和矿体研究的技术要求, 采用 1.5 m 的长度进行组合, 对组合样进行统计分析, 铜分布特征结果参数见表 1。另外, 由于特异值直接影响羊拉 5 号矿体铜品位的分布特征, 使得变异函数失去结构性, 因此必须进行特高品位处理, 根据矿山勘探报告对特异值的识别及处理原则, 我们选 97.5% 的置信区间处样品值定为特高品位下限为 2.141%。处理完特异值后, 对铜品位分布进行统计分析, 发现铜品位分布发生正偏斜, 不服从正态分布(图 2), 取对数后近似正态分布(图 3), 因此下一步可以选用克

表 1 组合样铜品位统计参数一览表  
Table 1 Statistic parameters of copper grades of composite samples

| 元素 | 最小值<br>1% | 最大值<br>1% | 平均值<br>1% | 标准差   | 变化系数  |
|----|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| 铜  | 0.017     | 2.703     | 0.744     | 0.557 | 0.748 |

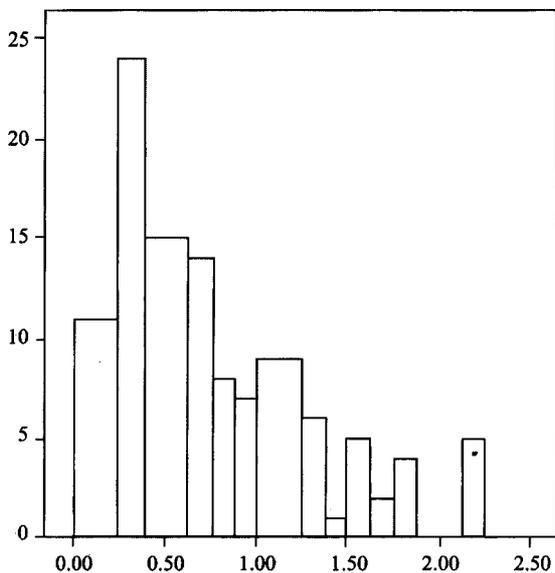


图 2 Cu 品位分布直方图  
Fig. 2 Distribution histogram of the copper grade

立格方法对矿体进行品位估值和储量计算。

### 2.3 变异函数模型的建立

#### 2.3.1 实验变异函数的计算

在经典统计学中, 通常采用均值、方差等一类参数来概括的反映品位特征量的全貌, 却无法反映局部范围和特定方向上地质特征的变化, 这是因为经典统计学只考虑数值大小, 不考虑数据的空间位置关系。而在地质统计学中, 要研究矿床中金属品位分布的特征其中一个重要的方面就是理解品位沿某一个或某几个方向或距离是如何变化的, 通常就采用变异函数来分析, 它不仅考虑了品位数值大小, 而且还考虑品位变化的空间位置关系, 使得统计的品位分布特征更趋于合理(孙洪泉, 1999; Surpac software 国际软件公司, 2005)。

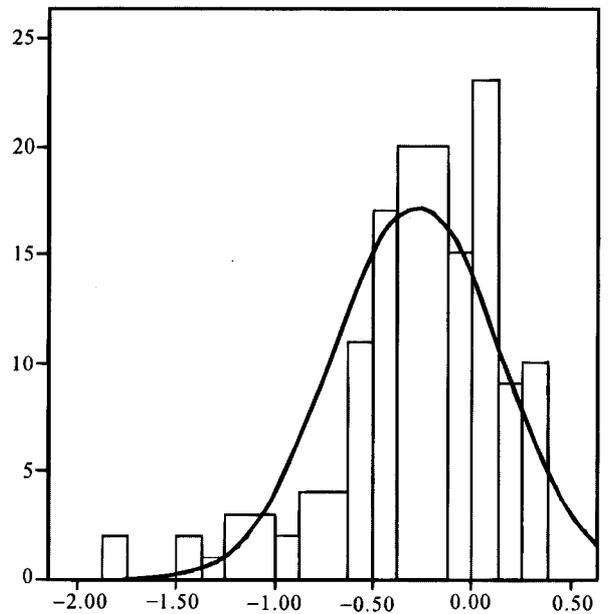


图 3 取对数后直方图  
Fig. 3 Histogram of the copper grade counted logarithm

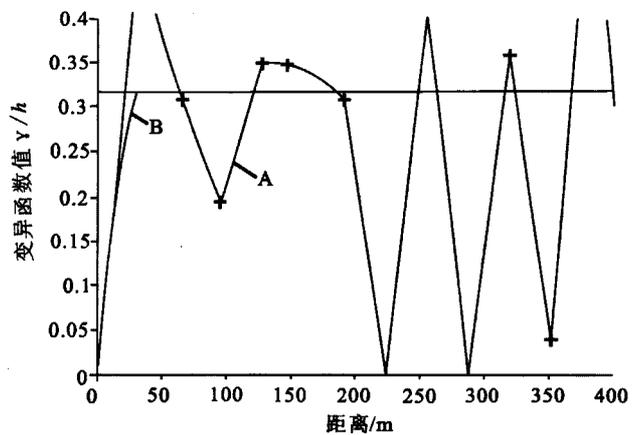


图 4 铜品位厚度方向实验变异函数曲线及其拟合曲线  
Fig. 4 Experimental variation function curves and fitting curves in copper grade and thickness orientation

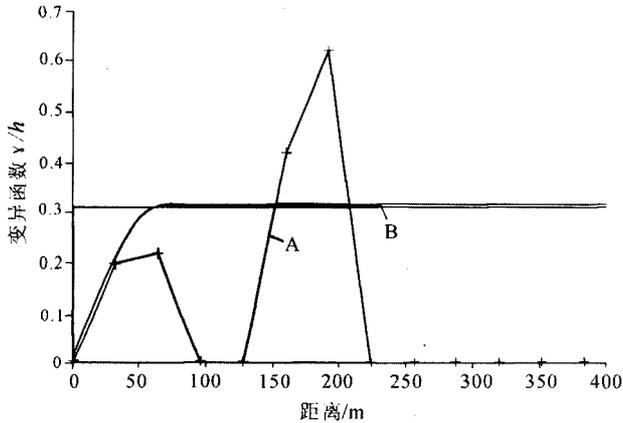


图5 铜品位倾向方向实验变异函数曲线及其拟合曲线  
Fig. 5 Experimental variation function curves and fitting curves in copper grade and dip direction

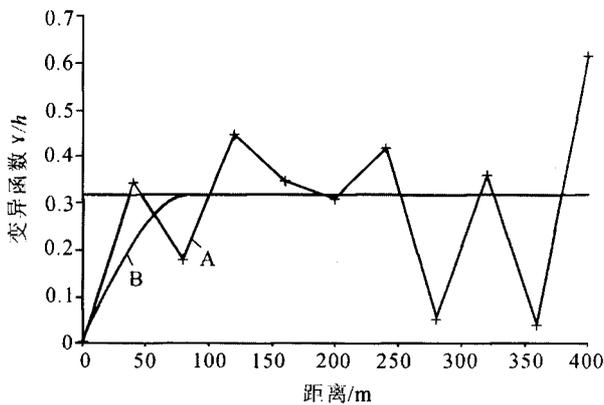


图6 铜品位走向方向实验变异函数曲线及其拟合曲线  
Fig. 6 Experimental variation function curves and fitting curves in copper grade and strike direction

计算羊拉5号矿体铜品位实验变异函数时，主要考虑矿体厚度、倾向和走向3个方向的变异函数分析，同时绘制出三个方向的实验变异函数曲线图，图4、5、6中A为铜品位的实验变异函数曲线。从图中可以看出，3个方向的曲线波动性都较大，尤其厚度方向波动性最大，说明羊拉5号矿体铜品位变化较大、分布不均匀。

2.3.2 理论变异函数的曲线拟合

从5号矿体铜品位分布得出的实验变异函数曲线的特征来看(如图4、5、6中A)，虽然数据点的分布不很规则，但仍可看出变异函数随距离首先增加，然后趋于稳定，符合球状模型的特点，因而采用实验变异函数球状模型用加权多项式回归法分别对走向、倾向、厚度3个方向进行拟合。

通过对羊拉5号矿体铜品位3个方向实验变异函数的研究，发现它们都可以用1个带有块金常数的球状模型进行拟合，经过反复实验，确定铜品位的理论变异函数曲线，如图4、5、6中B：

从图4、5、6中可以看出，羊拉5号矿体铜品位变异函数在3个方向上基本是各向异的，这与矿床地质成因是相一致的。求得球状模型的参数如下：

矿体厚度方向： $C_0=0.011005$ ， $C=0.295193$ ， $a_1=32.577$ ；

矿体倾角方向： $C_0=0.011005$ ， $C=0.295193$ ， $a_2=68.927$ ；

矿体走向方向： $C_0=0.011005$ ， $C=0.295193$ ， $a_3=83.624$ 。

其变异函数分别表示为

厚度方向：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.011005 + 0.295193 \times \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{32.577} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{32.577} \right)^3 \right] & 0 < h \leq 32.577 \\ 0.306198 & h > 32.577 \end{cases} \quad (1)$$

倾向方向：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.011005 + 0.295193 \times \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{68.927} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{68.927} \right)^3 \right] & 0 < h \leq 68.927 \\ 0.306198 & h > 68.927 \end{cases} \quad (2)$$

走向方向：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.011005 + 0.295193 \times \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{83.621} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{83.621} \right)^3 \right] & 0 < h \leq 83.621 \\ 0.306198 & h > 83.621 \end{cases} \quad (3)$$

从以上三个变异函数公式表明羊拉 5 号矿体铜品位变异函数具有方向上的异向性, 即在不同方向上表现为基台值相同, 变程不同的几何异向性, 各向异性比为:

$$L = a_1 : a_2 : a_3 = 32.577 : 68.927 : 83.621 = 1 : 2.117 : 2.567 \quad (4)$$

在这里我们用带状各向异性对模型进行套合(带状各向异性模型几乎可用于任意试验各向异性模型), 变异函数的套合结构为:

$$\gamma(h) = 0.011005 + 0.295193[\text{sph}(32.577) + \text{sph}(68.927) + \text{sph}(83.621)] \quad (5)$$

式中的  $\text{sph}(32.577)$ 、 $\text{sph}(68.927)$  和  $\text{sph}(83.621)$  表示变程分别为 32.577 m、68.927 m 和 83.621 m 的球状模型。其相应的转换矩阵为:

$$A = \begin{vmatrix} 32.577 & 0 & 0 \\ 0 & 68.927 & 0 \\ 0 & 0 & 83.621 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2.117 & 0 \\ 0 & 0 & 2.567 \end{vmatrix} \quad (6)$$

2.3.3 变异函数交叉检验

为了对结构模型进行检验, 采用了交叉验证方法, 以判断变异函数拟合参数的选取是否正确。其基本方法是: 利用所得结构模型和已知样品去估已知值, 然后把这些真值和估计值进行比较, 对两者的残差(差值)进行统计分析, 以判断变异函数结构的正确性。交叉验证结果如下:

通过验证计算, 残差的分布为正态分布(图 8,

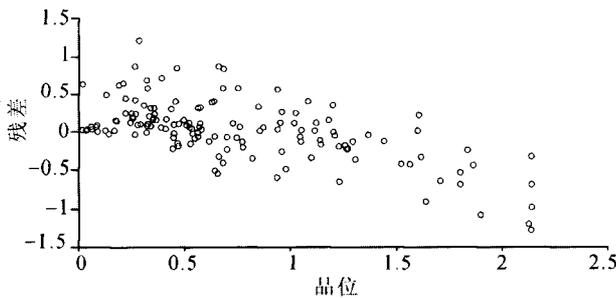


图 7 残差 VS 品位统计图  
Fig. 7 Statistics of residual VS grade

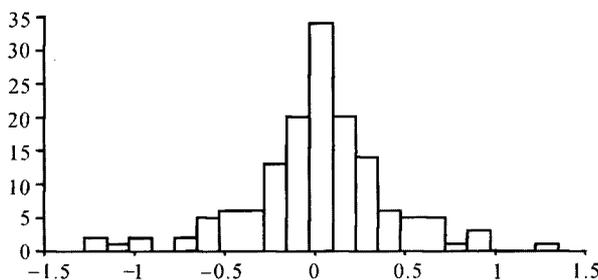


图 8 铜品位交叉检验残差分布直方图  
Fig. 8 Residual error histogram of copper grade cross-test

表 2 残差统计参数一览表  
Table 2 Statistical parameters of residual errors

| 变量   | 残差     |
|------|--------|
| 均值   | 0.017  |
| 方差   | 0.153  |
| 标准差  | 0.391  |
| 变异系数 | 23.512 |

表 2), 铜品位实际值与估计值之间的误差均值趋于零, 表明模型确定合理, 变异函数参数对铜品位进行估计是无偏的, 满足区域化变量内蕴假设, 能用于下一步的储量计算。

3 储量计算

为了充分利用地质统计学能够分析区域化变量空间结构性的优势和克立格的最优无偏内插估值特点, 克立格法采用与距离幂次反比法相一致的参数进行计算, 为了更好的进行结果对比, 我们按照不同的边界品位进行全面的分析, 计算结果对比见表 3。

表 3 克立格法、距离幂次反比法、块段法储量计算结果对比表(矿体体重取 3.40 t/m<sup>3</sup>)

Table 3 Comparative table of the results of reserves calculated by Kriging method, inverse distance method and block method (specific gravity 3.40 t/m<sup>3</sup>)

| 计算方法    | 边界品位 | 矿石量 (万吨) | 铜金属量 (吨)  | 平均品位 (%) |
|---------|------|----------|-----------|----------|
| 克立格法    | 0.0  | 1158.291 | 76910.522 | 0.664    |
|         | 0.3  | 1072.308 | 78171.253 | 0.729    |
|         | 0.5  | 842.029  | 70814.639 | 0.841    |
|         | 0.7  | 532.172  | 51248.164 | 0.963    |
|         | 1.0  | 105.609  | 11521.942 | 1.091    |
| 距离幂次反比法 | 0.0  | 1158.492 | 80631.043 | 0.696    |
|         | 0.3  | 1071.136 | 75729.315 | 0.707    |
|         | 0.5  | 846.291  | 68634.200 | 0.811    |
|         | 0.7  | 523.380  | 48936.030 | 0.935    |
| 块段      | 1.0  | 218.913  | 23226.669 | 1.061    |
| 块段      |      | 733      | 70385     | 0.96     |

从表 3 中可以看出, 在羊拉 5 号矿体中运用距离幂次反比法计算的储量结果偏高, 这是因为距离反比法只考虑了距离的因素, 实际上是将值均值化了, 计算出的结果偏高或偏低, 而克立格法虽然也考虑了距离因素, 但同时也考虑了变程的因素, 也就是说克立格还考虑了样品的空间上的位置关系, 并不完全是均化的表现, 这也是克立格的优越之处, 当然也还有其它影响因素的作用。而运用传统的块段法计算储量最大的缺点是很不灵活, 效率低, 缺陷很多, 计算出的结果准确率也很低。所对应的铜品位-吨位曲线如图 9、10。

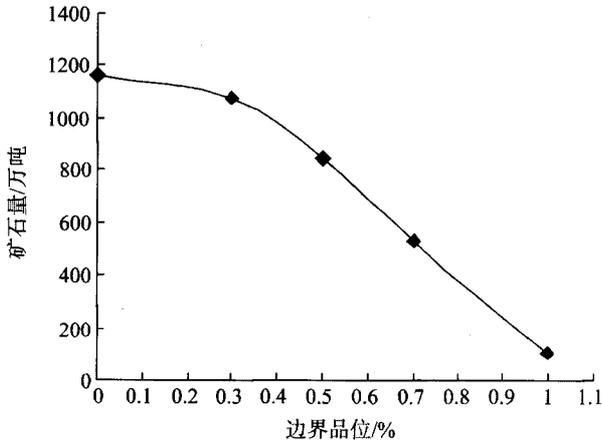


图 9 铜边界品位-矿石量曲线

Fig. 9 Marginal grade-ore reserves curve of copper

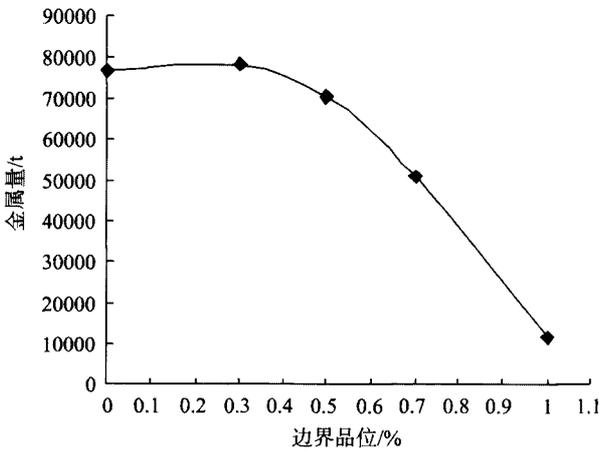


图 10 铜边界品位-金属量曲线

Fig. 10 Marginal grade-metallic productivity curve of copper

从铜品位-吨位曲线图 9、10 可以看出, 随边界品位的逐渐增高, 矿体的矿石量在不断降低, 而金属量则是先升高, 而后在下降, 因而我们可根据当前的金属价格和企业的生产成本, 可以快捷和准确地确定矿体的经济开采边界品位和吨位, 可为开采设计方案的优化提供可靠的依据。

#### 4 结论

文章综合运用地质统计学理论借助矿业软件建立了羊拉矿床 5 号矿体的数学模型, 并统计分析 5 号矿体铜品位分布规律, 发现厚度、倾向、走向 3 个方向的曲线波动性都较大, 尤其厚度方向波动性最大, 说明羊拉 5 号矿体铜品位变化大、分布不均匀。

通过对羊拉 5 号矿体储量计算分析, 可以看出, 在所研究的块段内, 采用克立格法计算的储量和距离反比法、传统块段法计算的储量相比, 克立格法计算的储量误差要小于距离反比法和传统块段法计

算的储量, 说明前者的估值优于后两者。因此对于总体趋势或单一因素影响的因子, 距离反比法的估计结果要好些, 而对于区域性的较大差异或多因素综合影响的因子而言, 克立格方法则要优越得多, 而尽量避免采用传统的效率很低的块段法计算储量。

文章最后还分析了羊拉 5 号铜矿体品位-吨位曲线图, 这为矿山合理确定经济品位和吨位提供了可靠的理论依据。

**致谢:** 感谢澳大利亚 Surpac 公司中国分公司栾忠先生的积极支持和帮助, 胡忠富先生对地质统计学储量计算全过程给予悉心指导; 野外地质调查工作中, 得到王勇教授、王彦斌教授等的悉心指导, 资料收集获得羊拉铜矿领导和专家的大力支持, 作者在此一并表示衷心感谢。

#### 参考文献:

- 白云来, 陈新明, 李小双, 郭文兵. 2008. 地质统计学研究及进展[J]. 矿业快报, 24(05): 1-6.
- 陈希清, 杨晓君, 陈富文, 高立宝. 2009. 应用 MAPGIS 数字高程模型提取区域地球化学异常信息的方法探讨[J]. 地球学报, 30(1): 119-125.
- 初道忠, 王青, 任凤玉, 赵增晖. 2006. 谦比西铜矿石品位分布的地质统计学研究[J]. 金属矿山, 363(9): 57-59.
- 邓明国, 王巨民, 秦德先, 李文昌, 林知法, 王金亮. 2006. 对数 Kriging 在矿山储量计算中的应用[J]. 金属矿山, 364(10): 49-52.
- 冯超东, 杨鹏, 胡乃联. 2007. 克立格法在 SURPAC 软件中的实现及应用[J]. 金属矿山, 370(4): 55-77.
- 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 2007. 统计学(第三版)[M]. 北京: 中国人民大学出版社.
- 林仕良, 王立全. 2004. 云南德钦羊拉铜矿床构造特征. 沉积与特提斯地质[J], 24(3): 48-51.
- 罗周全, 刘晓明, 吴亚斌, 刘望平, 杨彪. 2007. 地质统计学在多金属矿床储量计算中的应用研究[J]. 地质与勘探, 43(3): 83-87.
- 潘家水, 张乾, 李朝阳. 2000. 滇西羊拉铜矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿物学报, 20(1): 44-49.
- 尚晓明, 王李管. 2007. 地质统计学在某铜矿储量计算中的应用[J]. 中国铝业, 31(6): 12-16.
- Surpac software 国际软件公司. 2000. Surpac Vision 软件用户实用手册[G]. 北京.
- Surpac software 国际软件公司. 2005. Surpac Vision 地质统计学培训资料[G]. 北京.
- 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1990.
- 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- 魏奇奇, 陈开旭. 2004. 云南羊拉地区铜矿成矿系列[J]. 地质科技情报, 23(2): 21-24.
- 徐静, 胡乃联. 2007. Surpac 软件在某金铜矿山的应用研究[J]. 黄金科学技术, 15(1): 54-58.
- 周智勇, 陈建宏, 周科平. 2004. Surpac Vision 软件在矿床建模中

的应用[J]. 矿业工程, 2(4): 56-58.

## References:

- BAI Yun-lai, CHEN Xin-ming, LI Xiao-shuang, GUO Wen-bing. 2008. Research progress of geological statistics and its development in China[J]. Express information of mining industry, 24(05): 1-6(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xi-qing, YANG Xiao-jun, CHEN Fu-wen, GAO Li-bao. 2009. A discussion on the method for extracting regional geochemical anomaly based on mapgis digital elevation model[J]. Acta geoscientica sinica, 30(1): 119-125(in Chinese with English abstract).
- CHU Dao-zhong, WANG Qing, REN Feng-yu, ZHAO Zeng-hui. 2006. Study on grade distribution of chambishi copper ore using geological statistics[J]. Metal mine, 363(9): 57-59(in Chinese with English abstract).
- DENG Ming-guo, WANG Ju-min, QIN De-xian, LI Wen-chang, LIN Zhi-fa, WANG Jin-liang. 2006. Application of logarithm kriging in orebody reserve calculation[J]. Metal mine, 364(10): 49-52(in Chinese with English abstract).
- FEN Chao-dong, YANG Peng, HU Nai-lian. 2007. Realization and Application of kriging method in Surpac software[J]. Metal mine, 370(4): 55-77(in Chinese with English abstract).
- LIN Shi-liang, WANG Li-quan. 2004. Structural features of the Yangla copper deposit in Deqin, Yunnan[J]. Sedimentary geology and tethyan geology, 24(3): 48-51(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, WU Ya-bin, LIU Wang-ping, YANG Biao. 2007. Application of geostatistics in polymetallic deposit reserves calculation[J]. Geology and prospecting, 43(3): 83-87 (in Chinese with English abstract).
- PAN Jia-yong, ZHANG qian, LI Zhao-yang. 2000. REE Geochemistry of the Yangla copper deposit in western Yunnan[J]. Acta mineralogica sinica, 20(1): 44-49(in Chinese with English abstract).
- SHANG Xiao-ming, WANG Li-guan. 2007. Application of geostatistics for reserves estimation in a certain copper mine[J]. China molybdenum industry, 31(6): 12-16(in Chinese with English abstract).
- Surpac software international software company. 2000. Surpac Vision software user manual[G]. Beijing.
- Surpac software international software company. 2005. Surpac Vision geostatistics training materials[G]. Beijing.
- WEI Jun-qi, CHEN Kai-xu. 2004. Minerogenetic series of copper ore in Yangla region, Yunnan province[J]. Geological science and technology information, 23(2): 21-24(in Chinese with English abstract).
- XU Jing, HU Nai-lian. 2007. Application of Surpac Vision software in 3D modeling for a gold & copper mine[J]. Gold science and technology, 15(1): 54-58(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Zhi-yong, CHEN Jian-hong, ZHOU Ke-ping. 2004. Application of Surpac Vision software in establishing model of ore body[J]. Mining engineering, 2(4): 56-58(in Chinese with English abstract).