

# 矿产勘查与评估的统计地球化学方法

蒋 志

(武警黄金指挥部, 北京 100102)

[摘 要]统计地球化学在矿产勘查与评估中的应用,主要包括采样规则、临界品位计算、资源量/储量公式、边界品位确定、网度判别、矿床经济分类以及矿床开发风险等内容。

[关键词]统计地球化学 采样 品位 网度 资源量/储量 经济 风险

[中图分类号]P59;P628 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2002)01-0001-04

矿产的勘查与评估并不是分开的两件事,而是一边勘查,一边评估。勘查为评估提供依据,评估为勘查提供决策。勘查和评估的方法很多,统计地球化学方法只是其中的一种新方法。并且,这个方法不是个全面方法,不应试图用这个方法完全代替其它方法。这个方法是统计地球化学这个新学科在矿产勘查和评估中的应用<sup>[1~3]</sup>,而笔者在建立统计地球化学的过程中,主要的进展都是在《地质与勘探》上发表的,写本文同时也是祝贺她创刊 45 周年。

## 1 原 理<sup>[1~3]</sup>

统计地球化学建立在地质体中化学元素随机运动的基础上,它的前提是元素转移概率方程以及元素的空间分布、含量分布、聚集量分布和发现过程等函数。目前已有可用于实际的 40 个推论,其中,用于勘查布局的有品位-吨位关系、矿床规模的统计划分、区域矿化率公式、区域成矿率公式、矿床发现的时间过程、勘查成本与成矿率的关系等 6 个方面;用于勘查研究的有同一地质体、接触带、脉状和面状矿化、典型的、稳定的元素空间分布、成矿过程、成矿吸积模式和矿卷模式、成矿元素比值关系、比值和回归系数空间变化、迁移方向判据等 13 个方面;用于异常判别和解释的有异常判别、滤波、反演、推测成矿规模、用反射壁、吸收壁、吸收-反射壁描写成晕条件等 7 个方面;用于工程选择的有采样不确定关系、工程孔径公式、网度的判别、预测和控矿率等 5 个方面;用于储量/资源量估计的有平均值公式、品

位变异度、理论变异函数、广义克立格方法等 4 个方面;用于资源量/储量评价的有资源量统计公式和积分公式、利润函数、工业指标优化、品位系数与矿物粒度的理论关系等 5 个方面。

## 2 采 样

对矿产勘查中地质采样的主要要求是样品的代表性。样品代表性除了与分析精度有关外,主要与样品的大小和样品加工后的缩分有关。为了保证样品的代表性,根据统计地球化学中的采样不确定关系<sup>[1,3]</sup>,我们分别给出了如下的工程孔径公式  $r$ 、样品体积公式  $V$  和切乔特公式中样品缩分系数公式  $K$ :

$$\begin{aligned} r &\geq \frac{v(C - C_0)(C_1 - C)}{\pi h \sigma^2} \\ V &\geq \frac{v(C - C_0)(C_1 - C)}{(n - 1)\sigma^2} \\ K &= \frac{(C - C_0)(C_1 - C)}{\sigma^2} \left( \frac{\pi}{\sigma} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{v}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $C$ ,  $C_0$  和  $C_1$  分别为样品的平均含量、背景含量和上限含量;  $V$  和  $v$  分别为样品体积和样品中目标矿物的平均颗粒体积;  $r$  和  $h$  分别为工程孔径和工程所穿矿层的视厚度;  $\sigma^2$  和  $n$  分别是方差允许值和目标矿物颗粒被粉碎的倍数。

矿产勘查中地质采样主要有两个用途,一是判别异常,以便找矿;二是圈定矿体,计算资源量。在统计地球化学中,区分正常和异常的方法没有很大的不同,只是纳入了一个完整的理论体系中。但解译异

[收稿日期]2001-11-25;[修订日期]2001-12-17;[责任编辑]曲丽莉。

[作者简介]蒋 志(1939 年-),男,毕业于中国科技大学,教授级高级工程师,主要从事地质经济、地球化学等方面工作。

常却不同,如象物探那样反演异常,用边界条件判别异常真假,用负异常大小推测成矿规模等。为了圈定矿体,则发展出一整套方法,详见下面的叙述。这里只介绍尚无系统工程控制仅有样品含量分布时,推测 334 资源量的方法。

如果勘查区元素含量的分布密度函数为  $f(\xi)$ , 则根据统计地球化学,该区预查阶段的预测资源量 (334)  $\eta$  可估计为:

$$\eta = \int_{\xi \geq B} DS H \xi f(\xi) d\xi \quad (2)$$

式中,  $D$ ,  $S$  和  $H$  分别为勘查区的体重、面积和勘查深度;  $B$  为经验上类比的矿体边界品位。不过,在这种情况下,还不能具体圈出矿体边界,只能以勘查区的界限为边界。

### 3 试验

这里所说的试验是狭义上的,只包括矿床采、选、冶条件试验。为合理地使用勘查资金,既不能一开始就做试验,也不能到勘探阶段才做试验,而是随着勘查程度的提高,根据需要进行试验。预查阶段是不做试验的;普查阶段有的做可选性试验;详查阶段应做实验室流程试验,有的可做实验室扩大连续试验,甚至做半工业试验和工业试验;勘探阶段根据详查阶段的建议可做实验室扩大连续试验、半工业试验或工业试验。

做试验的目的只有一个,判断矿床的可利用性。具体讲,一是确定矿体边界,二是评估开采效益。这里先讲确定矿体边界。

确定矿体边界的根据是矿床临界品位,即矿床开发时的不赔不赚品位。矿床临界品位的公式是<sup>[2,3]</sup>:

$$\alpha_0 = \frac{\beta C}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (1 - \rho) D} \quad (3)$$

式中,  $C$  和  $D$  分别为单位矿石的采选冶成本和金属市价;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  和  $\rho$  分别是选矿回收率、冶炼回收和采矿贫化率;  $\beta$  是金属锭的纯度。这表明,临界品位是由矿床开采、选矿、冶炼条件、产品市场价格和所处的社会经济环境决定的。而矿床的临界品位或者是最低工业品位并决定边界品位(双指标情况),或者就是边界品位(单指标情况)。对临界品位估计的准确度与矿床的勘查程度和试验情况有关,总是

随着勘查程度的提高和试验代表性的增加而提高,所确定的矿床边界品位也更加符合经济要求。

### 4 网度

传统的勘查工程网度总是与矿床勘查类型共同存在,工程网度是相对确定的,勘查类型则变化较大,以至于对工程网度的争论较小甚或不争论、对勘查类型争论较大甚至莫衷一是而由最权威的一位说了算。新标准采用了不确定的工程网度而取消了勘查类型,实际上是把这两者统一起来。但从实际上看,人们囿于过去的思维定势,一接触到具体矿床甚至起草具体矿种的勘查规范,就又搬出了原来的老办法。20 世纪 80 年代前期,有感于原来办法的问题,我们曾从统计地球化学出发,提出了把两者结合起来的勘查网度数字判别和预测的方法<sup>[1,3]</sup>。但传统实在太强大了,是不可能被采纳的。就是新标准公布后,人们也还试图回到老路上去。因此,在这里不得不重提将近 20 年前的旧话。

实际上,我们的想法很简单:形体大的矿体与形体小的矿体,如果要达到同样的工程控制程度,则要求有同样的控矿工程数。因为只有这样,才可以取消固定的工程网度,工程网度视矿体大小而定;也只有这样,才可以摆脱关于矿床勘查类型的无谓争论,也不需要权威出来收拾局面,而是根据矿体内的工程数来定。具体的做法是,如果用  $m$  表示控制矿体的见矿工程数,用  $n$  表示其中与矿体边界无关的、矿体内部见矿工程数,则勘查工程网度的数字特征是:

预查网度:  $n = 0, m \sim 1$ ;

普查网度:  $n = 0, m > 1$ ;

详查网度:  $0 < \frac{n}{m} < \frac{1}{3}$ ;

勘探网度:  $\frac{n}{m} \geq \frac{1}{3}$ 。

### 5 估计

上述勘查网度是不能事先完全确定的,因为其中不但包含了原来较为固定的工程网度,还包含了原来变化较大的勘查类型。特别是布置勘查工程时,并不知道矿体的大小和形状,是一步步摸索前进的。更根本的原因是,矿体大小和形状未知是因为矿体边界品位未定。

预查和普查阶段,矿床的边界品位可以根据已

知类似矿床用类比方法给出。详查和勘探阶段,矿床的边界品位就要通过试算矿床的资源量后,按一定的原则如开发时可充分利用资源的原则或开发时可获得最大效益的原则给出。

在普查阶段或详查的前期阶段,对资源量试算的精度要求不高,资源量的估计可用传统方法进行。矿块的体积可用偏差较小的万能公式;矿块的平均品位并不是什么平均值公式都可用,而是要根据样品的特点具体应用如下平均值公式<sup>[3]</sup>:

$$\xi_p = \left( \frac{1}{n} \sum \xi^s \right)^{1/s} \tag{4}$$

所谓样品的特点是指  $n$  个样品的品位  $\xi$  及其权  $\lambda$  有如下线性关系:

$$\ln \lambda = a + b \ln \xi \tag{5}$$

而有

$$\xi_p = - \frac{\sum \lambda \xi}{\sum \lambda}, s = 2b + 1 \tag{6}$$

对详查后期阶段和勘探阶段,最好用无偏估计的克立格方法估计资源量。克立格方法中最有用的工具是变异函数,但变异函数一直是经验函数。我们从统计地球化学出发,建立了国际上迄今惟一的理论变异函数<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} Y(h) &= S^2 + \\ m^2 \left( 1 - \frac{f(t_0, x_0; t, x) f(t_0, x_0; t, x + h)}{[f(t_0, x_0; t, x)]^2} \right) \end{aligned} \tag{7}$$

从这个函数看,变异函数是由元素转移概率密度函数决定的。并且,元素转移概率密度函数为正态函数成指数函数时,理论变异函数与经验上的高斯模型或指数模型一致。重要的是,理论变异函数告诉我们,内蕴假设或平稳假设很难被满足。因此,对实际的勘查数据,必须通过数学变换,使变换后的数据合乎这些假设要求。为此,我们提出了广义克立格方法<sup>[3]</sup>,包括平稳变换、消偏变换、消畸变换、求优变换、非负变换和求简变换等数据变换方法,并对变换后数据

$$\zeta = \zeta(\xi) \tag{8}$$

建立了包含泛克立格和协同克立格的如下广义克立格方程:

$$\begin{bmatrix} Y & M \\ M' & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \\ M_0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

上式中,每一个矩阵元都是矩阵,并且,这二级矩阵的矩阵元还是矩阵。其中,  $Y$  对应的是由变异函数决定的相关矩阵;  $M$  是由飘移决定的空间变化矩阵;  $\lambda$  和  $\mu$  是拉格朗日乘数矩阵;  $O$  是零矩阵。由上式可求得  $\zeta$  的  $m$  阶中心距  $\mu_m$ ,从而可求得  $\zeta$  的  $j$  阶原点距  $M_j$ :

$$M_j = \sum_m a_{mj} \mu_{mj} \tag{10}$$

因此,第  $k$  元素的含量估值和估值克立格方差分别为:

$$\begin{aligned} \xi_{k1}^* &= M_1 \\ \sigma_{k1G}^2 &= M_2 - M_1^2 \end{aligned} \tag{11}$$

有了每个相同单元的品位估值,计算其金属量和矿石量就容易了。

无论用什么方法估计出的金属量  $\eta$  和矿石量  $Q$ ,都是其边界品位的函数。应用统计地球化学方法,我们给出了两种这样的函数,一种是统计形式,与前人一致;一种是积分形式,是我们独有,分别表示如下<sup>[1~3]</sup>:

$$\begin{aligned} Q &= A + K \int_{\xi \geq \eta} f(\xi) d\xi \\ \eta &= a + k \int_{\xi \geq \eta} \xi f(\xi) d\xi \end{aligned}$$

和

$$Q = (A - K \ln B)^{3/2} \tag{12}$$

$$\eta = a + k \int_0^{A/K - \ln B} \sqrt{re^{-r}} dr$$

这些理论公式与实际符合得很好,可以用来建立利润函数<sup>[1~3]</sup>:

$$R = \eta - \alpha_0 Q \tag{13}$$

式中,  $\alpha_0$  是前述临界品位。上式的直观意义是,矿床开发时投入与  $\alpha_0 Q$  成正比,产出与  $\eta$  成正比,  $R$  是两者之差,自然与利润成正比,而称为利润函数。利润函数随边界品位变化,并会出现极大值。利润函数极大值所对应的边界品位,就是最大利润条件下的边界品位。由式(12)和式(13)可求得这样的边界品位是<sup>[1,3]</sup>:

$$B_m = \begin{cases} \frac{3 K^{3/2} e^{A/K} \alpha_0}{2 k} \text{ (统计公式)} \\ \frac{K}{k} \alpha_0 \text{ (积分公式)} \end{cases} \tag{14}$$

对同一矿床来说,上式的两种计算结果一致。这

就是统计地球化学给出的边界品位与临界品位的关系式,可以用它计算矿体的资源量,并根据圈入矿体控矿工程数判别其网度,从而区分资源量是推断的(333)、控制的(332)还是探明的(331)。

6 评价

对矿产资源成果的分类是在矿床经济研究的基础上进行的,对矿床的经济研究可分为概略研究、预可行性研究和可行性研究,目的是确定矿床边界品位和对已圈定的矿体逐一进行经济评价。实际上,是在每个勘查阶段结束后,先确定边界品位,圈定矿体,区分资源量,然后才是逐个对矿体进行经济评价。

在实际工作中,不同类型矿床经济研究的界限不是十分明确,必须加以界定。为此,我们把工程网度和采选冶条件的观测和试验联系起来,提出如下的分类(表 1)。

表 1 矿床经济研究分类

| 网度   | 详查采选冶条件<br>观测和试验 | 勘探应做的采选冶<br>条件观测和试验 | 经济研究分类 |
|------|------------------|---------------------|--------|
| 任何网度 | 不要求做或未做          |                     | 概略研究   |
| 详查网度 | 已做               | ——<br>要求做而未做        | 预可行性研究 |
| 勘探网度 |                  | 要求做并已做<br>不要求做而未做   | 可行性研究  |

对已估算资源量的矿体进行经济评价,主要是计算其内部收益率(顺便指出,在统计地球化学中也可以给出这两个量的表达式<sup>[3]</sup>),然后与行业平均

内部收益率  $\rho$  及其变化  $\Delta$ (顺便指出,在统计地球化学中也可以给出这两个量的表达式<sup>[3]</sup>),然后与行业平均内部收益率  $\rho_1$  比较。为了把开发风险考虑在内,我们做如下分类:

经济的:  $\rho - \Delta \geq \rho_1$ ;

边际经济的:  $\rho_1 > \rho - \Delta \geq 0$ ;

次边际经济为:  $\rho - \Delta < 0$ ;

内蕴经济的:从概略研究中得出,经济效益不清楚。

这样,我们就可以从矿床的控制资源量(332)中区分出预可采储量(122)、基础储量(122b, 2M22)和资源量(2S22),从矿床的探明资源量(331)中区分出可采储量(111)、预可采储量(121)、基础储量(111b, 121b; 2M11, 2M21)和资源量(2S11, 2S21)。如果勘查和评估与时具进,则经济效果最好,控制的资源量将只是 2S22;探明的资源量将只是 2S11 和 2S21。

对于待采的矿床,其开发的风险不仅可从经济研究中给出,还可以从矿床的成矿特征中推测出来。例如在砂金矿中,经验上开采品位  $\xi_1$  与地质品位  $\xi_0$  的比值与开采贫化率  $\rho$  有关,并成正比(比例系数  $k$ )于金颗粒的平均体积  $v$ 。在统计地球化学中,可以给出同样的理论公式:

$$\frac{\xi_1}{\xi_0} = (1 - \rho)(1 + kv)$$

(15)

等等。

[参考文献]

[1] 蒋 志. 地质勘查效益理论[M]. 北京:冶金工业出版社,1992, 1~159.  
[2] 蒋 志. 地质体运动理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1995,138~312.  
[3] 蒋 志. 矿床效益估计的理论和方法[M]. 北京:地质出版社, 1995,1~167.

STATISTICAL GEOCHEMISTRY METHODS OF EXPLORATION AND ESTIMATION FOR MINERALS

JIANG Zhi

(The Gold Headquarters of Chinese Peoples Armed Police Force, Beijing 100102)

**Abstract:** In this paper, the statistical geochemistry methods of exploration and estimation for minerals are recounted. The applications of the methods are mainly engaged in sampling rules, critical - grade calculation, resources/ reserves formulae, cutoff - grade defining, exploration network discrimination, economic classification of ore deposits, and development risks of mineral deposit, etc.

**Key words:** statistical geochemistry, sampling, grade, network, resources/ reserves, economy, risk