

# 次生晕数据的对数正态泛克立格法 研究及异常评价

侯景儒 张树泉 张廷勋 申士亮

(北京科技大学)

姜毅

(冶金部第三地质勘查局·山西太原市)

首先介绍了对数正态泛克立格法的基本理论和方法,包括对数正态分布,三参数对数正态分布,求解估值 $Z^*$ 所需的权系数 $\lambda_a$ 及求解漂移值 $m^*$ 所需的权系数 $\rho_a$ 的对数正态泛克立格方程组。其次,笔者应用对数正态泛克立格法探讨了华北某测区的次生晕数据、元素统计分布特征以及变异函数及结构分析。最后,给出测区估计结果,元素综合异常图,划分出5个异常区,并结合地质条件对异常进行了综合评价。

**关键词:** 三参数对数正态分布; 变异函数; 结构分析; 对数正态泛克立格法

对数正态泛克立格法是地质统计学的新方法,与其他方法相比(如趋势面分析等),采用对数正态泛克立格法处理大面积、多批量化探数据更为优越。本文系应用对数正态泛克立格法处理某区化探次生晕数据,进行异常评价并圈定出若干金矿有利成矿地段。

## 区域地质简述

研究区位于太古代花岗岩—绿岩带分布区,具有基底和盖层双层结构。基底由太古界五台群角闪岩—绿片岩相变质岩组成,呈北东向带状分布于区域西北部。岩性为斜长片麻岩、含榴斜长角闪岩、黑云变粒岩和浅粒岩等,原岩以火山岩为主,认为是花岗岩—绿岩带的组成部分。盖层由元古界、下古生界碳酸盐岩建造组成。元古界地层为一套浅海—滨海相镁质碳酸盐岩建造,局部夹碎屑岩,其中高于庄组有4个合金层位,该套地层分布于区域中部及西部。下古生界由寒武纪和奥陶纪地层组成,寒武系为一套滨海—浅海相的碎屑岩—碳酸盐岩建造,奥陶系为一套以灰岩为主的碳酸盐岩建造。

在大地构造位置上,研究区位于华北地台山西

台背斜五台山台隆北部。五台运动最强烈,使早期地层及岩浆岩发生大面积褶皱隆起和区域变质作用。燕山期是本区又一构造活动期,以断裂构造和岩浆活动为特征,褶皱及变质作用不明显。基底构造呈北东向,五台群在本区西北部形成一北东向紧密向斜构造,盖层以断裂构造为主,是燕山期形成的。

区内各时代均有岩浆活动,尤以晚太古代五台期最强烈,晚元古代蓟县期、中生代燕山期次之,前者形成大面积的奥长花岗岩岩体,后者形成遍布全区的辉绿岩脉群及浅成一次火山岩相的中酸性小岩体(脉),晚期以酸性岩浆侵入为主,形成黑云母花岗岩岩株及大量酸性岩脉。

区内金矿化类型多,有中低温热液型的铅锌多金属矿体(化),伴生金达13.23g/t;有中温热液细脉浸染型铜钼矿床,伴生金达6g/t;有产于五台群变粒岩、斜长角闪岩中的铜金矿点,金含量为1.12g/t;有产于燕山期花岗闪长岩与高于庄组白云岩接触带的接触交代型金矿化;有产于构造破碎带的金矿化;有产于长城系高于庄组白云岩中的金矿化,含金量可达6.80g/t;还有生于黑云斜长片麻岩中的含金硫化物石英脉。

## 对数正态泛克立格法

对测区化探次生晕数据处理前,先对将要采用的对数正态泛克立格法作一阐述。

众所周知,基于经典统计学的一些数学地质方法,在应用过程中必须注重方法的基本原理及其应用条件。例如常用的趋势面分析是用最小二乘法来调整多项式,它假设所有被观测到的样品值概率相等,而忽略了对地质工作至关重要的样品的相对位置,用以处理物化探数据时,很难表明所表示的实际结构,即用趋势面分析计算出的某变量的趋势面是一个简单的数字结果,其实际物理意义常含混不清。本文处理该区化探次生晕观测的数据是采用对经典统计学的理论、方法加以改造的地质统计学方法。

在应用地质统计学研究某区域化变量的属性或其空间分布规律时,首先应研究该区域化变量的统计分布律。正态分布及对数正态分布是研究区域化变量时常见的分布类型,由于所研究地区的区域化变量Au、Ag、As是服从(三参数)对数正态分布,因而,笔者将用对数正态泛克立格法来处理该区化探次生晕数据。下面就对数正态泛克立格法的理论与方法进行简要讨论。

根据对数正态守恒假设,当观测值呈对数正态分布时,观测值的平均值也呈对数正态分布,而且它们的联合分布也保持对数正态分布。但是,对数正态变量的线性组合则不符合对数正态分布。

设定义于支撑 $V_a$  ( $a=1, 2, 3, \dots, n$ )上的区域化变量 $x_a$ 呈对数正态分布,其期望为 $Z$ ,方差为 $\bar{C}(v_a, v_a)$ ,则,  $y = \ln(x_a)$  ( $a=1, 2, 3, \dots, n$ )是期望为 $Z_a$ 、方差为 $\bar{C}_a(v_a, v_a)$ 的正态分布。则有如下关系式

$$Z = e^{Z_a + \frac{1}{2}\bar{C}_a(v_a, v_a)} \quad (1)$$

$$\bar{C}(v_a, v_a) = Z^2 \cdot (e^{\bar{C}_a(v_a, v_a)} - 1) \quad (2)$$

许多金属矿床的品位值及元素的地球化学观测值不服从上述对数正态分布(如本区的Au、Ag、As化探次生晕观测值),它们在对数坐标纸上呈现出程度不等的偏畸。为消除由此而产生的误差,在对原始数据 $x_a$ 进行统计研究时,不是用 $\ln(x_a)$ 代替 $x_a$ ,而是用 $y = \ln(x_a + b)$ (其中 $b$ 为第三参数)代替 $x_a$ (如本区Au、Ag、As的统计学研究的结果),使区域化变量呈正态分布。这种分布类型即所谓三

参数对数正态分布,设 $\ln(x_a + b)$ 的平均值为 $Z'_a$ ,方差为 $\sigma^2$ ,则三参数对数正态分布的平均值是:

$$Z' = \exp\left(Z'_a + \frac{1}{2}\sigma^2\right) - b \quad (3)$$

下边将简要讨论对数正态泛克立格法的基本原理。

设研究区D内,某区域化变量样品观测值及块段值均服从对数正态分布,其平均值为 $Z$ ;又设D内某待估块段为 $V$ ,其平均值为 $Z_V$ ,而 $Z_V$ 的估计量为 $Z_V^*$ ,其对数值 $\ln Z_V^*$ 可表示为 $n$ 个已知数据 $\ln(x_a)$  ( $a=1, 2, 3, \dots, n$ )的线性组合:

$$\ln Z_V^* = C + \sum_{a=1}^n \lambda_a \ln(x_a) \quad (4)$$

式中 $C$ ,  $\lambda_a$ 是待定系数,  $x_a$ 是定义于信息支撑 $v_a$  ( $a=1, 2, 3, \dots, n$ )的 $n$ 个信息值(样品观测值)。

对数正态泛克立格法研究的问题是:(1)列出并求解克立格方程组;(2)求出(4)式中所需要的诸权系数 $\lambda_a$ 及 $C$ ;(3)给出该估计的最小估计方差——对数正态泛克立格方差。其目的是求出(4)式中的 $n$ 个权系数 $\lambda_a$ 能保证估计量无偏,且估计方差为最小。

假设 $\bar{C}_a(v_a, v_\beta)$ 是矢量 $n$ 的两个端点分别在样品支撑 $v_a$ 及 $v_\beta$ 内的所有对点的平均对数协方差; $\bar{C}_a(v_a, V)$ 是矢量 $n$ 的两个端点分别在样品支撑 $v_a$ 及待估域 $V$ 内的所有对点的平均对数协方差,可证明仅当满足

$$\sum_{a=1}^n \lambda_a = 1 \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n \lambda_a \bar{C}_a(v_a, v_\beta) - \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_a \lambda_\beta \bar{C}_a(v_a, v_\beta) \quad (6)$$

时, $Z_V^*$ 才是 $Z_V$ 的无偏估计量。

这类类似于普通克立格法,在满足上述无偏性条件,并使其估计方差

$$D^2[\ln Z_V^* - \ln Z_V] = \bar{C}_a(V, V)$$

$$= \sum_{a=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_a \lambda_\beta \bar{C}_a(v_a, v_\beta) - 2 \sum_{a=1}^n \lambda_a \bar{C}_a(v_a, V) \quad (7)$$

最小的情况下得到求解(4)式中 $\lambda_a$ 的对数正态泛克立格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} \bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\beta}) - \mu = \bar{C}_e(v_{\alpha}, V) \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1 \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

$\mu$  为拉格朗日乘数, (8) 式为  $(n+1)$  阶线性方程组, 求解 (8) 式可得  $n$  个权系数  $\lambda_{\alpha} (\alpha = 1, 2,$

$$Z_{\nu}^* = e^{\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \{ [\ln(x_{\alpha}) + \frac{1}{2} \bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\alpha})] - [\frac{1}{2} \bar{C}_e(v_{\alpha}, V) + \frac{1}{2} \mu] \}} \quad (10)$$

$Z_{\nu}^*$  也可根据  $\ln Z_{\nu}^*$  (对数正态克立格法估计的对数克立格估值) 及估计该值的样品数  $n$  和估计方差  $\bar{\sigma}_e^2$  值利用 H.S. Sichel 给出的估计因子表由下式求得:

$$Z_{\nu}^* = e^{\ln Z_{\nu}^* \gamma_n (\bar{\sigma}_e^2)} \quad (11)$$

(11) 式中的  $\gamma_n (\bar{\sigma}_e^2)$  依赖于  $n$  及  $\bar{\sigma}_e^2$ 。

$\ln Z_{\nu}^*$  的对数正态克立格方差是:

$$\sigma_{K^*}^2 = \bar{C}_e(V, V) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \bar{C}_e(v_{\alpha}, V) + \mu \quad (12)$$

而估值  $Z_{\nu}^*$  的克立格方差是:

$$\sigma_{K^*}^2 = Z_{\nu}^{*2} \left[ e^{\bar{C}_e(v_{\nu}, V)} + e^{\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\beta})} - 2e^{\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \bar{C}_e(v_{\alpha}, V)} \right] \quad (13)$$

$\sigma_{K^*}^2$  也可根据  $\sigma_{K^*}^2$  利用 Sichel 表求出估计精度的上、

... ,  $n$ ), 根据 (6) 式及 (8) 式可得常数项  $C$  的简化式:

$$C = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} [\bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\alpha}) - \bar{C}_e(v_{\alpha}, V)] - \mu \right\} \quad (9)$$

根据 (4) 式可得到  $Z_{\nu}$  的无偏最优线性估计量  $Z_{\nu}^*$ ,

下限表示。

当所研究的区域变化量在估计邻域内有漂移 (drift) 存在时, 则应用对数正态泛克立格法进行研究, 这时的对数正态泛克立格方程组是:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} \bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\beta}) - \sum_{l=0}^k \mu_l b_{l\alpha}^* = \bar{C}_e(v_{\alpha}, V) \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} b_{l\alpha}^* = b_l^* \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n) \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad (l = 0, 1, \dots, k) \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $b_{l\alpha}^*$  为信息域  $v_{\alpha}$  的多项式函数,

$b_l^*$  为待估域  $V$  的多项式函数。

其矩阵形式为:

$$[K_{ue}] \cdot [\lambda] = [M_{ue}] \quad (15)$$

$$[\lambda] = [K_{ue}]^{-1} \cdot [M_{ue}] \quad (16)$$

式中:

$$[K_{ue}] = \begin{bmatrix} \bar{C}_e(v_1, v_1) & \bar{C}_e(v_1, v_2) & \dots & \bar{C}_e(v_1, v_n) & b_{v_1}^0 & b_{v_1}^1 & \dots & b_{v_1}^k \\ \bar{C}_e(v_2, v_1) & \bar{C}_e(v_2, v_2) & \dots & \bar{C}_e(v_2, v_n) & b_{v_2}^0 & b_{v_2}^1 & \dots & b_{v_2}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \bar{C}_e(v_n, v_1) & \bar{C}_e(v_n, v_2) & \dots & \bar{C}_e(v_n, v_n) & b_{v_n}^0 & b_{v_n}^1 & \dots & b_{v_n}^k \\ b_{v_1}^0 & b_{v_2}^0 & \dots & b_{v_n}^0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_{v_1}^1 & b_{v_2}^1 & \dots & b_{v_n}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{v_1}^k & b_{v_2}^k & \dots & b_{v_n}^k & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu_0 \\ -\mu_1 \\ \vdots \\ -\mu_k \end{pmatrix} \quad [M_{ue}] = \begin{pmatrix} \bar{C}_e(v_1, V) \\ \bar{C}_e(v_2, V) \\ \vdots \\ \bar{C}_e(v_n, V) \\ b_{V}^0 \\ b_{V}^1 \\ \vdots \\ b_{V}^k \end{pmatrix}$$

其对数正态泛克立格方差为:

$$\sigma_{K^*}^2 = \bar{C}_e(V, V) + \sum_{l=0}^k \mu_l b_l^* - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \bar{C}_e(v_{\alpha}, V) \quad (17)$$

下边再讨论漂移值的估计问题。设研究区  $D$  内某待估块段为  $V$ , 它的漂移值的平均值示为  $m_{\nu}$ , 而  $m_{\nu}$  的估计量为  $m_{\nu}^*$ , 对数值  $\ln m_{\nu}^*$  可表示为  $n$  个已知数据  $\ln(x_{\alpha}) (\alpha = 1, 2, \dots, n)$  的线性组合:

$$\ln m_{\nu}^* = C + \sum_{\alpha=1}^n \rho_{\alpha} \ln(x_{\alpha}) \quad (18)$$

如同求该待估块段  $V$  的真值  $Z$  的估计值  $Z_{\nu}^*$  一样, 求式 (18) 中的  $\rho_{\alpha}^*$  可解下列对数泛克立格方程组而得到:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \rho_{\beta} \bar{C}_e(v_{\alpha}, v_{\beta}) - \sum_{l=0}^k \mu_l b_{l\alpha}^* = 0 \\ \sum_{\alpha=1}^n \rho_{\alpha} b_{l\alpha}^* = b_l^* \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n) \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad (l = 0, 1, \dots, k) \end{cases} \quad (19)$$

对应的对数正态泛克立格方差为:

$$\sigma_{\ln}^2 = \sum_{i=0}^k \mu_i b_i^2 \quad (20)$$

当求得每一待估块段V的泛克立格估值 $Z_V^*$ 及漂移值 $m_V^*$ 后,即可求出每一待估块段V的涨落值 $F_V^*$ :

$$F_V^* = Z_V^* - m_V^* \quad (21)$$

## 次生晕数据的对数正态泛克立格法研究

在256km<sup>2</sup>的测区内,生产单位以50~100m不等间距进行了化探次生晕的随机取样18691个,每个样品均分析了Au、Ag、As、Cu、Pb、Sb、Mn、Ni、Mo、Zn元素,元素分析合格率均在90%以上,质量可靠。

为便于结果的应用,在进行测区次生晕数据的对数正态泛克立格法研究时,仍按生产单位沿用的分幅处理,即将全测区划分为11幅图(编号M1~M11)分别进行研究。为对全区异常有整体了解,有助于成矿有利地段的评价,又把全区11幅图的18691个样品合并统一研究,给出全区异常分布图。计算是在IBM PC/AT微型机及Honeywell HDS3小型机上完成的,全区样品的计算研究是在VAX-780计算机上完成的,所用的计算程序是北京科技大学地质系编写的2D-GeoSTAT程序系统,整个研究的流程图如图1所示。

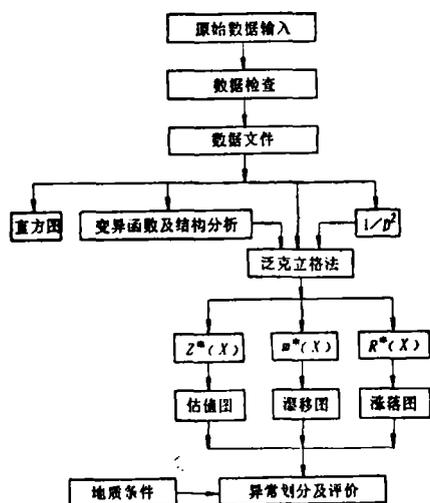


图1 实际工作流程

现就有关问题说明如下:

### 1. 元素统计分布特征的研究

在进行物化探及其地质数据处理前,首先要研究数据的统计分布特征,因为,分布函数是地质体最重要的数学特征,它具有鉴别和成因意义;并且查明观测值的分布律是进一步统计分析工作的基础,如选择合适的统计分析方法,确定原始数据是否需要变换以及评价统计分析的效果。

正态分布是连续型随机变量常见的一种重要分布律,许多数学地质方法的理论和实践均以变量呈正态分布为前提,当地质观测值呈正态分布时就会取得较好的结果。如原始数据不呈正态分布,可设法做某种变换,使之呈正态分布后再进行数学地质研究。如经变换仍不呈正态分布,则统计分析结果只能是一种近似估计。当然,在这种情况下,也可以采用非参数性的统计方法或稳健统计学方法。

数理统计是从总体中抽出子样,根据子样的概率分布规律进行总体估计和推断。直方图能近似地描绘随机变量的分布律,它虽然是近似的,但在实践中却是常用的一种研究1个子样概率分布的基本方法。

对于某些连续型变量的观测值,除做直方图分析外,还可以利用概率纸进行分析和计算。

当某一变量的观测值呈正态分布时,直方图反映出的密度函数 $f(x)$ 的图形(即分布密度曲线)呈单峰、对称,而且在对称轴两侧 $x = \mu + \sigma$ 处各有1个拐点( $\mu$ 为平均数, $\sigma$ 为标准差)。正态分布函数的图象在算术概率纸上为一直线。当某一变量的观测值呈对数正态分布时,通过直方图反映出的密度函数 $f(y)$ 呈现出不对称的分布,如果“粗尾巴”在正(右)方向上,称正向倾斜,反之,称负向倾斜。对数正态分布的密度曲线是正向倾斜曲线,它在算术概率纸上的图象呈1条反“S”曲线,当把原始数据 $x_a$ 取对数 $\ln(x_a)$ 后,其密度曲线呈现正态分布的密度曲线的图形,在算术概率纸上也随之呈现为一直线。当某一变量的观测值数据 $x_a$ 取对数后仍不呈现正态分布的特征,可用 $\ln(x_a + b)$ 来代替 $x_a$ 做直方图,经过这种变换后,呈现出正态分布特征,则称该变量服从三参数对数正态分布,而常数 $b$ 称为第三参数。

研究表明,本区Au、Ag、As元素呈三参数对数正态分布。但除Au外,Ag及As在11幅图中的第三参数 $b$ 各不相同(表1),这就给计算变异函数和对数正态泛克立格估计提出了原始数据变换依据,

各图幅中Au、Ag、As的b值

表 1

图幅号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Au	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ag	0.3	0.3	0.03	0.001	0.001	0.007	0.003	0.04	0.007	0.01	0.001
As	0.15	0.08	2.3	0.1	3.8	7.0	0.5	0.8	1.5	5.0	5.0

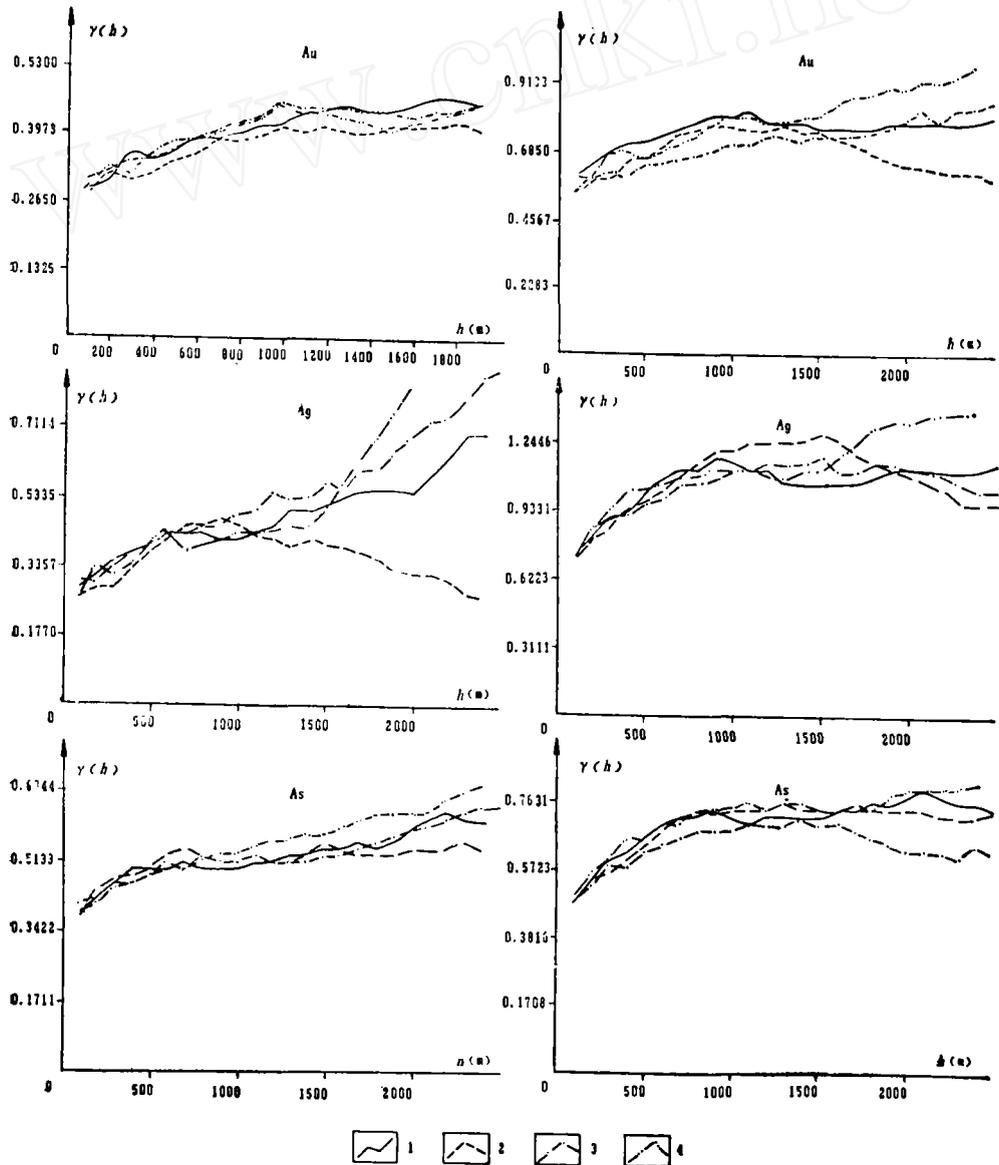


图 2 Au、Ag、As元素  $\gamma^*(h)$  曲线

1—0°方向, 2—45°方向, 3—90°方向, 4—135°方向

2. 变异函数计算及结构分析  
在“内蕴假设”下, 变异函数定义为区域化变

量  $Z(x)$  和  $Z(x+h)$  的增量平方的数学期望,  
 $2\gamma(h, a) = E\{(Z(x) - Z(x+h))^2\}$

$$= \gamma_{or} \{Z(x) - Z(x+h)\}$$

具体的计算和结构分析方法从略，现仅就本测区具体的数据变异函数计算及结构分析时考虑到的若干作法予以说明。

(1) 本区土壤样品中Au、Ag、As的分布特征均成三参数对数正态分布，每个元素在每幅图中第三参数  $b$  均不相同(表1)，因此，在计算各元素和每幅图的变异函数时均按  $\ln(x_a + b)$  计算。

(2) 为研究元素在不同方向上的变异特征，对每个元素及在每一幅图上均计算了4个方向的变异函数，即  $0^\circ$ ， $45^\circ$ ， $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 。

(3) 本区数据为不规则分布(即既非行列线，间隔又不规则)，故在计算某一方向  $\alpha$  上的  $\gamma^*(h)$  时，可给出该方向的角度允许误差限  $d_\alpha$ 。即在  $\alpha + d_\alpha$  范围内的数据均可视为沿  $\alpha$  方向上的数据，加以选

择应用，再按间隔  $(K \cdot h \pm e(r))$  组合成距离组，以此计算  $\gamma^*(K \cdot h)$  值， $e(r)$  称为距离允许误差限。笔者在计算本区数据的变异函数值  $\gamma^*(h)$  时， $d_\alpha$  采用  $22.5^\circ$ ， $e(r)$  采用基本滞后  $h$  的  $1/2$ 。

计算得到各图幅不同元素的试验半变异函数曲线(图2)。

### 3. 对数正态泛克立格估计

根据各元素半变异函数所表征的元素在本区的变异特征、采样的平均间距和兼顾图幅之间的对比等因素，待估块段定为  $200 \times 200 \text{m}^2$ ，估计邻域由  $3 \times 3$  个块段组成，即  $300 \times 600 \text{m}^2$ 。

根据每个元素含量的分布特征及元素在各自半变异函数曲线上表现的变异性并考虑到图幅之间的对比，对Au、Ag、As 3个元素在各图幅中进行泛克立格估计时均设在  $x$ 、 $y$  方向上为1次漂移。图

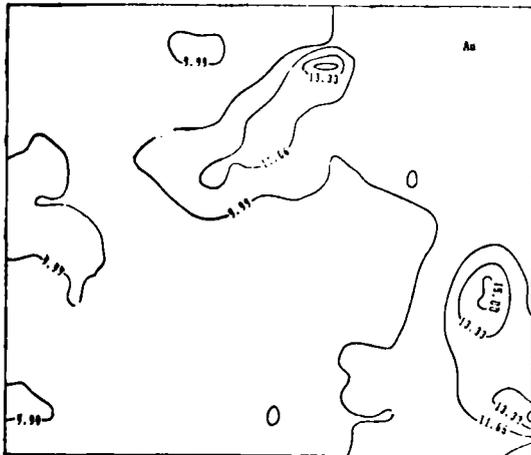


图3 M4图幅Au、As次生晕泛克立格估值等值线图

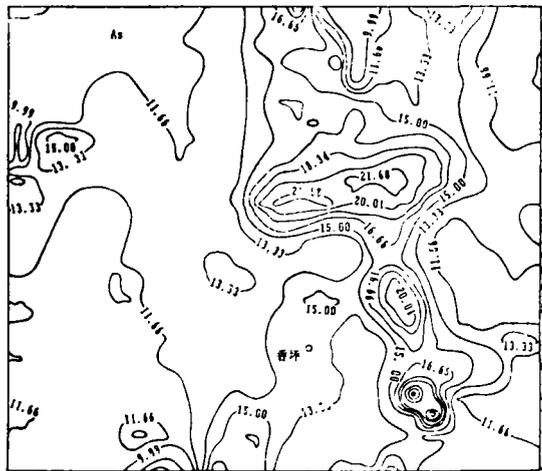
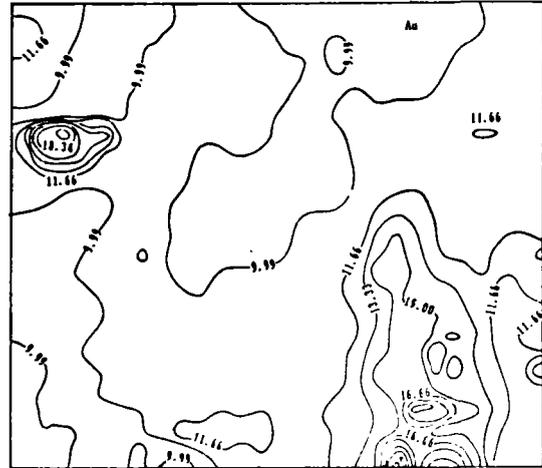


图4 M7图幅Au、As次生晕泛克立格估值等值线图

3、4、5 分别是M4、M7、M10图幅的 Au、As对数正态泛克立格估计值等值线图。

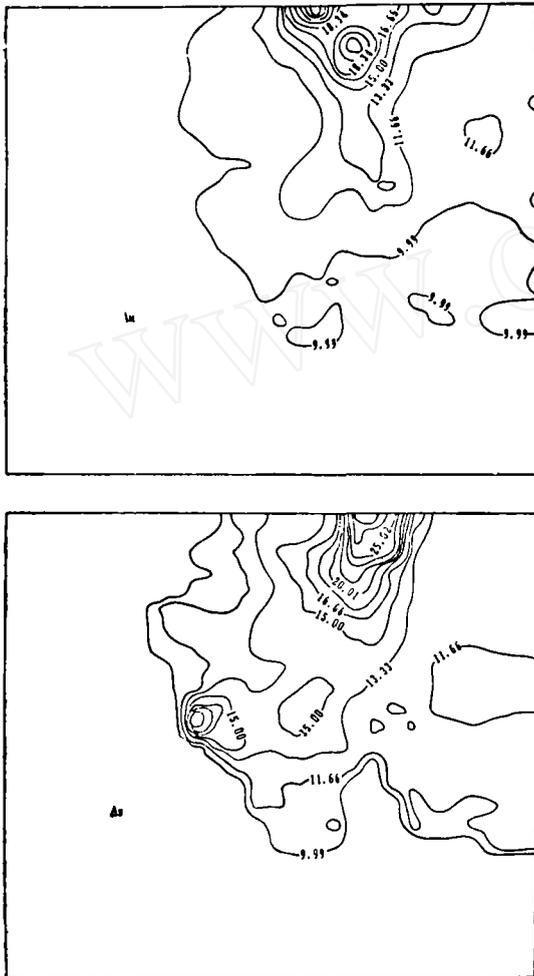


图 5 M10图幅 Au、As次生晕泛克立格估值等值线图

### 异常的解释与评价

上述的各元素对数正态泛克立格估值的等值线图可提供成矿作用的空间结构信息。用这些信息可进一步提出异常区，并对其进行解释与评价。

#### 1. 异常下限的确定

在研究中，可采用以下方法来确定异常下限：

(1) 利用算术概率纸计算异常下限。首先将对应于累积频率等于50%的元素含量值(中位数 $M_e$ )当成元素地球化学背景值，再读出对应于累积频率等于15.9%的元素含量值 $X_1$ ，则标准差 $S = M_e -$

$X_1$ ，其异常下限值 $= M_e + 2S$ 。例如本区 Au 的异常下限的确定，首先将其分组并把对应的累积频率落在算术概率纸上，对应于累积频率为50%的 Au 含量对数值为1.31，即 $M_e = 1.31$ (对数值)，累积频率等于15.9%的金含量对数值为0.68，即 $X_1 = 0.68$ ， $S = 1.31 - 0.68 = 0.63$ ，异常下限对数值为2.57，其真值为13.06ppb，考虑到其他因素，最后确定金的异常下限为13.66ppb。(2) 以研究区各成矿元素的浓度差从平稳涨落到急剧陡增的转折点作为异常下限。在元素含量等值图上反映等值线由稀疏骤变密集。本区 As 异常下限用此法确定为13.33 ppm。(3) 以样品元素含量均值加2倍方差为异常下限，如本区 Ag 的均值 $X = 0.1549$ ppm，方差为0.4099，则 $X + 2\sigma^2 = 0.9647$ ppm，还考虑到第2种确定异常下限的方法，最后确定 Ag 的异常下限为1.02ppm。

#### 2. 异常的解释与评价

通过对 Au、Ag、As 元素异常的观察和异常的空间分布、异常组合及地质条件，将本区的异常划分为5个异常区(图6、7、8)。

本区异常可分为3类：(1) 与中生代中酸性侵入岩有关的金矿(化)异常(已有开采的小型金矿床)。此类异常规模大、峰值高、明显与侵入岩有关。是 Au 矿化最好的一类异常，成矿远景大；(2) 与太古代五台群花岗岩-绿岩带变质岩中断裂有关的金矿化异常(已发现金矿化)，属有一定远景的异常区；(3) 与元古代长城系高于庄组白云岩有关的

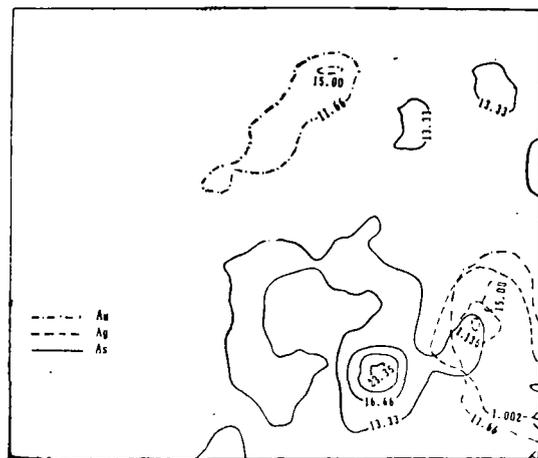


图 6 M4图幅次生晕泛克立格法估计综合异常图

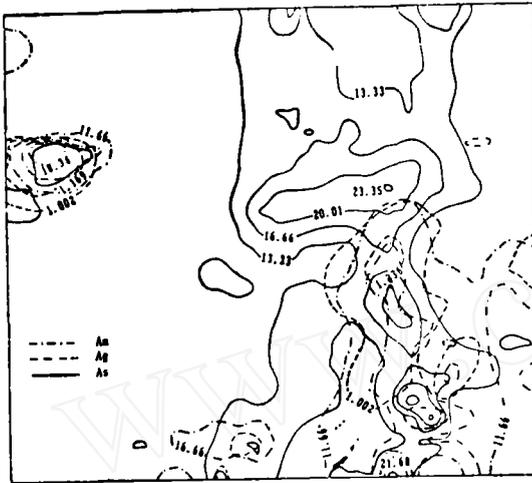


图 7 M7图幅次生晕泛克立格法估计  
综合异常图

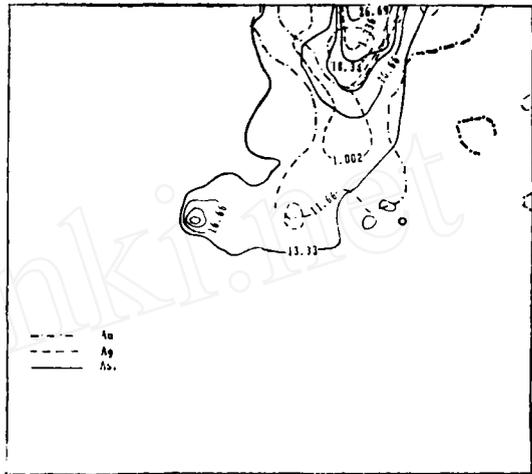


图 8 M10图幅次生晕泛克立格法估计  
综合异常图

Au矿化异常, 明显受层位控制, 可为寻找卡林型金矿的有望异常。

## 结 论

1. 本区元素分布多呈三参数对数正态分布, 表明元素含量受不同时代地层及不同期次的岩浆活动和构造运动影响, 这与本区地质特征是一致的。

2. 元素变异函数表明了本区元素的变异特征, 为提高效益, 降低勘探成本, 可应用变异函数提示给出Au的变异性, 结合估计方差提供的信息

来确定测区的最佳采样方案。

3. 通过研究, 本区可分为若干个异常区, 其中与中生代酸性侵入岩有关的金矿异常成矿远景较大, 与太古代五台群花岗岩—绿岩带变质岩中断裂有关的金矿化异常有一定找矿意义, 但也不可忽视卡林型金矿的寻找。

4. 地质统计学是处理化探数据行之有效的办法, 这是因为地质统计学的基本理论和方法在解决地质找矿有关问题时具有显著的适应性。

此项研究, 得到山西冶金地质勘探公司马晋屏、真允庆二位高级工程师热情指导, 致以谢意。

## Processing of Secondary Halo Data and Assessment of Geochemical Anomalies Using Lognormal Universal Kriging

Hou Jingru Zhang Shuquan Zhang Tingxun Shen Shiliang Jiang Yi

First of all, basic theory and techniques of lognormal universal kriging (LUK) are introduced in this paper, dealing with lognormal distribution, three parameter lognormal distribution, weighting coefficients  $\lambda_a$  required for the evaluation of estimate value  $Z_i^*$  and the weighting coefficients of LUK equation system  $\rho_a$  required for calculating the value of drift  $m_i^*$ . Then a discussion is made on processing the secondary halo data from an area in North China by LUK techniques in following aspects: the statistical distribution feature of chemical elements, variogram function and structural analysis. Lastly, the LUK estimation of the elements of the said area, and synthetical anomaly maps are given. The five anomaly zones delineated were comprehensively assessed in the light of geological condition.