原生晕剖面金属量变异趋势延拓方法探讨

刘仁亮　杨传耕　湛存德

本文意在探索使用延拓方法解释评价与热液作用有关的化探异常，以供讨论参考。

理论依据

1. 成晕理论　尽管形成原生晕作用非常复杂，影响原生晕发育的因素也很多，但归结起来热液分散模式主要为扩散异常和渗滤异常，是由扩散作用和渗滤作用形成。谢学锦曾经指出："渗滤与扩散代表自然界两个极端，实际上总是在一起进行，交错在一起"。可以设想，如果金属的运动是在静止介质中以扩散作用进行时，即使是极细小的裂隙也会使一定量的矿液发生流动，而在矿液流动的过程中也不可能没有扩散作用发生。扩散作用和渗滤作用难以截然分开。

2. 原生晕模型　各类热液矿床原生晕的特征，国内外已经积累了丰富的资料。在热液矿床原生晕的各种特征中，要算原生晕的分带结构最具理论和实践意义。原生晕形成机制的各种学说都必须能够阐明原生晕的分带规律，应用原生晕定性和定量判断矿体埋深、矿床侵蚀截面深度、矿床成份类型等找矿评价方法，无一不是以原生晕的分带规律为基础的。因此，研究原生晕特征也必然集中在原生晕分带规律这个关键问题上。苏联已经排列了大量矿床原生晕中元素沿轴向和横向分带序列。但是，从确定元素分带序列的方法来看，不论是C．B．格里戈良的分带指数计算法，还是E．M．克维雅特科夫斯基的金属量梯度计算法，以及各种判定侵蚀截面深度和确定矿床成份类型的计算方法，决定的因素是成矿指示元素含量变化规律。对单个指示元素是如此，对组合元素之间也是如此。由此可见，矿床原生晕的根本特征——分带结构，是通过元素金属量的变化而呈现的。许多典型矿床原生晕研究成果就证明了这一点。

现据有关资料，归纳出热液矿床原生晕结构模型（图1）。

从图可以看出，成矿指示元素含量在轴向（垂向）方向及横向方向都呈规律性的变异。它既是通过计算确定矿床原生晕分带结构的量值，也可作为评价异常的直接参数。特别是由标型成矿元素所形成的矿上原生晕具有重大的实际意义。它不仅是矿床成分类型的直接指示标志，而且含量的大小及变异规律，特别是垂直方向——轴向的变异趋势，无疑可以用来直接评价异常。

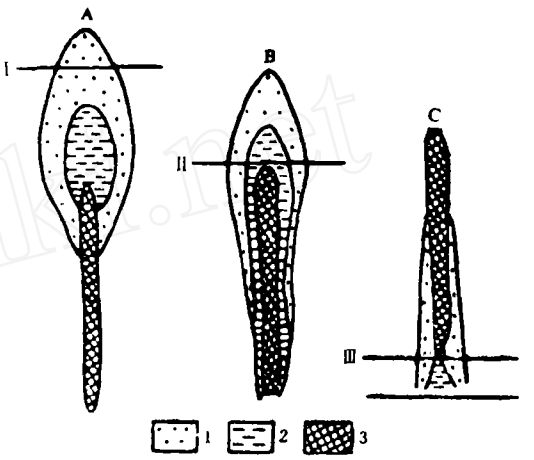

图1　热液矿床剖面原生晕结构模型

A—矿上组分晕；B—中部组分晕；C—矿下组分晕；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—侵蚀面水平；1—元素含量为P；2—元素含量$>P$；3—矿体

3. 金属含量变异规律　为了利用实际观测数据建立实验函数，需要适当的理论模型，而数学模型的建立又应以矿致原生晕中成矿元素含量变化规律为依据。根据成晕理论及原生晕结构模型，假设异常内成矿元素含量C_x的变化规律为：

$$C_x = C_{max}\, e^{\frac{-X}{K}}$$

式中：C_{max}—场源最高含量，

X—距离，

K—扩展系数。

对上式两边取对数得：

$$\lg C_x = \lg C_{max} + \frac{\lg e}{K} \cdot X$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

令：$y = \lg C_x$，$a = \lg C_{max}$，$b = \frac{-\lg e}{K}$

则得：$y = a + bX$

根据回归直线方程求解系数的方法，或利用电算器统计功能，可求出 a，b 参数，建立理论方程。现举例（表1、图2、图3）说明：

表1

序号	某热液型锌矿脉			铜矿峪变斑岩型铜矿		
	X（米）	C_x（ppm）	$\log C_x$	X（米）	C_x（ppm）	$\log C_x$
1	0	891	2.95	0	3549	3.550
2	5	440	2.64	2	1933	3.286
3	10	600	2.78	4	917	2.962
4	13	420	2.62	6	800	2.903
5	15	220	2.34	8	783	2.894
6	20	100	2.00	10	833	2.921
7	25	130	2.11	12	717	2.856
8	30	120	2.08	14	700	2.845
9	35	80	1.90	16	767	2.885
10	40	90	1.95	18	683	2.834
11	45	100	2.00	20	550	2.740
12	50	50	1.70	22	500	2.699
13	60	60	1.78	24	567	2.751
14	70	80	1.90	25	400	2.602
15	75	40	1.60			
16	80	40	1.60			
17	90	40	1.60			
18	100	30	1.48			

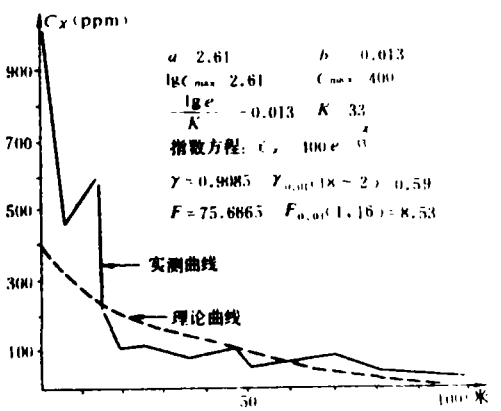

图2 某热液型锌矿脉附近围岩中实测数据曲线

（据吴锡生，1980）

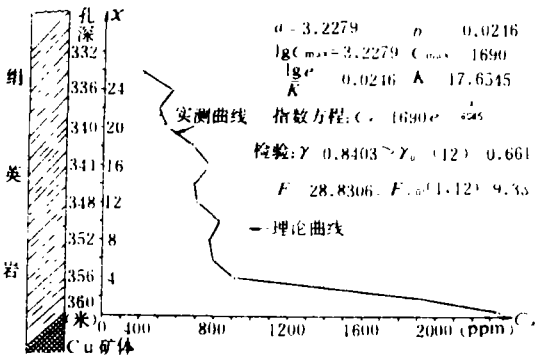

图3 铜矿峪001孔变斑岩型铜矿体原生晕Cu量垂直变化曲线

（据211队钻孔分析结果）

还可列举不少实例均可证明：主要成矿元素原生晕金属含量，不论是由矿体向围岩（横向）方向和垂直（轴向）方向，或是矿上晕由晕中心向侧向（水平）方向，均呈指数规律变化。

数学模型

根据不少矿床试验结果，正象图1归纳所示那样，可以推理认为：矿致化探异常剖面向下延拓时，矿上组分晕及成矿组分晕的金属含量趋势是由低增高，局部极值定位在深部方向，它可能是热液矿化晕的中心（场源）。据此建立理想模型如下。

以图4表示矿床原生晕金属含量变异规律为：

$$y = b\,e^{\frac{x}{K}}$$

即由矿体向两侧方向、轴向方向及矿上晕由中心向两侧金属含量均以负指数函数规律变化。但函数常量参数 b 数值不同，而且沿横向及轴向其扩展系数 K 值也可能不等。因为热液成矿过程中沿着垂直（轴向）方向有扩散作用，又有渗滤作用叠加，在渗滤作用中又有沿水平方向的扩散。据此，对矿上原生晕可概括为：垂直横剖面上任意一点处之金属含量与场源极大值之间的关系，可以用公式：

$$C_x = C_{max}\,e^{\frac{-h}{K_h}}\,e^{\frac{-l}{K_l}}$$ 表示。

C_{max}—场源极大值

h—距场源垂直距离，

l—距轴线水平距离，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

K—扩展系数。反映元素迁移能力大小，取决于元素的化学活动性、围岩性质及沉淀作用方式，它表征异常扩展宽度。据成晕理论推知，此系数在轴向和横向应该不同，因轴向方向渗滤作用较强，故K_h应大于K_l。

图4是由场源向周围的金属含量变化关系，进行异常剖面延拓时，是由地表向深部搜索场源位置，因此理想数学模型应为金属含里变化公式的反算公式，垂直及水平方向的相对坐标起点应取相反方向（由地表向深部，由两侧向异常中心）。

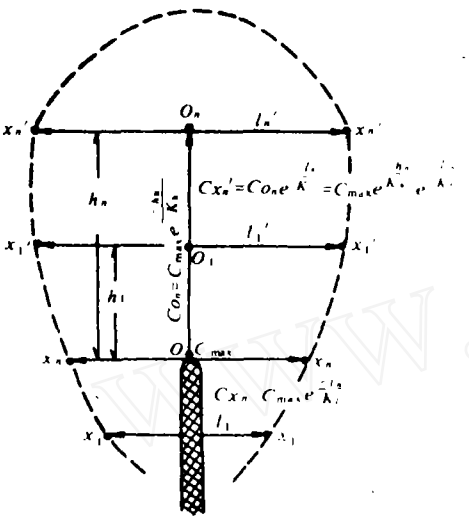

图4　矿床原生晕金属含量变化规律示意图

C_{max}—场源极大值；h—距场源相对垂距；l—距异常轴线相对水平距；K_h—垂向扩展系数；K_l—水平方向扩展系数；x—垂直横剖面上含量点位；C—金属含量

据此，本文选用的理想数学模式为：

$$C_x = C_{min}\, e^{\frac{l}{K_l}}\, e^{\frac{h}{K_h}} \qquad (1)$$

此式暂名为"双指数函数"，C_{min}为初始极小值。为了确定有关参数，（1）式两边取对数得：

$$\lg C_x = \lg C_{min} + \frac{\lg e}{K_l}\cdot l + \frac{\lg e}{K_h}\cdot h \qquad (2)$$

令：$\lg C_x = y$，$\lg C_{min} = b$，$\frac{\lg e}{K_l} = b_1$，

$\frac{\lg e}{K_h} = b_2$

（2）式可变为：$y = b_0 + b_1 l + b_2 h$　（3）

依据（3）式即可利用垂直横剖面上的实测数据（成矿元素含量），以l，h为自变量进行二元回归统计，得出b_0，b_1，b_2各参数，再依所令各式求出函数参数，建立实验双指数函数公式，进行延拓计算。

延拓方法步骤

1. **数字准备**　矿床原生晕金属含量的空间分布具有结构性与随机性双重性质，为了消除（或减弱）随机成分，必须首先对实测垂直横剖面各采样点含量进行沿线滑动平均作出含量变化曲线图。滑动时一般以3个样品为一个窗口，据采样情况，必要时也可以5个样品为一窗口。如果出现混合总体形态，可采用分解曲线分解出叠加部分含量。为了消除岩石样不均匀性，也可使用主要成矿元素累加值。经上述处理后即可转换成对数含量值，参加回归计算。

2. **绘制延拓计算网格**　为了计算方便，可据不同比例尺绘制计算网格。以剖面最高含量点为中心，根据岩矿层产状适当确定原生晕轴线倾角，过中心点作晕轴线，把异常剖面（对称）分开。平行轴线以一定间隔作水平方向等距线l，以地形最高点作水平（或与l直交线）起始线，并以同等间隔作其平行线得垂直方向等距线h，构成计算网格。网形一般有四种（图5），A适用直立矿体热液型、岩浆型矿床及

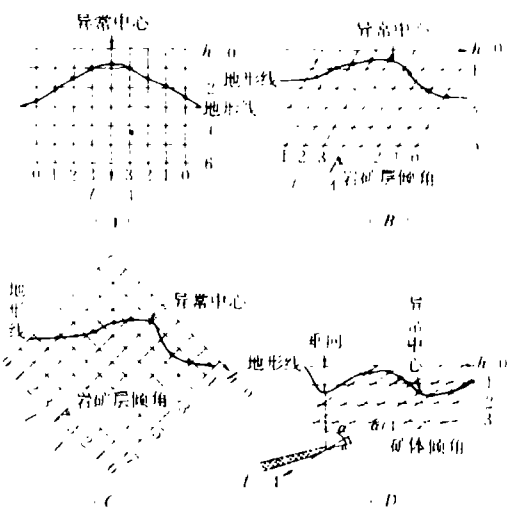

图5　延拓计算网形

水平（或直立）接触交代矿床；B适用于矿体倾斜热液型、沉积—热液型矿床；C适用于倾斜矿体沉积型（层）及其他层控矿床；D适用于平缓产状（倾角

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

<30°）的矿体，其轴向倾角为：矿体倾角+（90°-矿体倾角）/4，因为平缓产状矿体所形成的原生晕的前峰偏上，故轴向与矿体轴向不一致。网格选择可依异常区控矿地层、构造产状及矿床类型，进行试验对比，择优选用。

3. 度量各采样点坐标值 网形确定后，即可在网格上度量各采样点相对坐标值（l，h）。一般情况下把异常轴线两侧看成对称，度量各测点距晕轴线 l 之距离值，统一参加回归分析。如异常两侧差异显著，也可分为两翼分别进行回归分析。其值使用无量纲单位。成图后预测场源埋深时可依比例尺换算。

4. 回归分析 设各采样点对数含量为 y，水平坐标变量 l 为 x_1，垂直坐标变量 h 为 x_2，建立回归方程：

$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$（其方法参阅有关书刊）。

进行 F 检验并分别检验 x_1，x_2 在回归方程中的显著性：

$$F_{(l)} = \frac{b_1^2 / C_{(x_1)}}{Q / n-2-1}$$

$$F_{(h)} = \frac{b_2^2 / C_{(x_2)}}{Q / n-2-1}$$

$C_{(x_1)}$、$C_{(x_2)}$ 是正规方程组系数矩阵 A 的逆矩阵 A^{-1} 中第 i 行第 i 列上的元素，经数学推导（过程从略）其值为：

$$C_{(x_1)} = n L_{22} / |A|$$

$$C_{(x_2)} = n L_{11} / |A|$$

$|A|$ 为正规方程组系数矩阵行列式值，经数学推导（过程从略）其值为：

$$|A| = n\Sigma x_1^2 \Sigma x_2^2 + 2\Sigma x_1 \Sigma x_2 \Sigma x_1 x_2 - \Sigma x_1^2 (\Sigma x_2)^2 - \Sigma x_2^2 (\Sigma x_1)^2 - n(\Sigma x_1 x_2)^2$$

查 F 分布表得 $F_{0.01}(1, f_{\text{残}}) = T_1$，如果 $F_{(h)} > T_1$，说明 h 为显著变量，证明成矿元素金属含量具有明显垂直变异规律。即可进行延拓计算。

利用回归系数求解函数参数：

$$K_l = \frac{\lg e}{b_1} = \frac{0.4343}{b_1},$$

$$K_h = \frac{\lg e}{b_2} = \frac{0.4343}{b_2},\ C_{\min} = \text{anti}\lg b。$$

建立双指数函数公式：

$$C_x = C_{\min}\, e^{\frac{l}{K_l}}\, e^{\frac{h}{K_h}}$$

利用所建立的函数公式，计算出各网格交点含量值，直至场源极大值（取工业平均品位）出现。

5. 二次趋势分析 上述回归分析，实质上是化曲线为直线的线性回归。为了更好地拟合原生晕金属含量等值线形态，分解局部成分，突出趋势成分，可使用网格交点含量值，进行二次趋势分析，求出二次趋势面方程，计算出网格交点趋势值，勾绘趋势面。趋势分析方法用TI—59计算器非常简便（程序从略），也可应用正交多项式进行手算（具体方法见《云南物化探》，1977年，第5期）。

为了指导工程验证，从经济概念出发，在趋势延拓剖面图中，圈出具有经济意义的浓度带，取成矿元素的边界品位等量线为成矿浓度带界面 C_p，地表至 C_p 的距离即为盲矿体埋深。在成矿浓度带中，存在着元素的工业浓度时，赋存工业矿体的概率最大。

矿区试验

为了检验本文所提出的方法是否有实际效果，利用笔者手头仅有的实际资料，选择了中条山铜矿峪矿区1—17号、1—18号及多字沟矿区80线由盲矿体形成的异常进行了延拓试验（表2）。结果表明，所建

已知矿区延拓试验结果　　表2

矿区	异常（测线）号	异常定性解释		矿体（带）埋深（米）		埋深误差	
		延拓断推	验证结果	延拓推断	验证结果	绝对（m）	相对（%）
铜矿峪	1—17	含矿异常	矿异常	18	23	-5	-22
	1—18	〃	〃	90	78	+12	+15
多字沟	80线	〃	〃	170	145	+25	+17
平均						±14	±18

注：异常数据为光谱分析结果。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

立的回归方程是高度显著的。垂直变量 h 在回归方程中在不显著性水平上是显著变量。铜量向深部均依双指数函数规律递增，定性解释均为含矿异常，与勘探结果一致。例如多字沟异常依80线地表实测剖面，经回归分析建立双指数函数方程（表3），再经二次趋势分析，获得铜量趋势延拓剖面如图6。

多字沟 80 线回归计算结果　　表3

序号	滑动平均值 C_x	y $\lg C_x$	x_1 (l)	x_2 (h)	中间参数	计算结果
1	50	1.699	0.26	1.3	$\bar{x}_1 = 4.4163$	$b_0 = 1.6401$
2	180	2.2553	1.4	1.6	$\Sigma x_1 = 70.66$	$b_1 = 0.1355$
3	283	2.4518	2.6	2.0	$\Sigma x_1^2 = 377.4876$	$b_2 = 0.0975$
4	360	2.5563	4.0	2.5	$\bar{y} = 2.4055$	$C_{min} = 43.66$
5	415	2.618	5.2	3.0	$\Sigma y = 38.488$	$K_l = 3.2052$
6	465	2.6675	6.1	3.05	$\Sigma y^2 = 94.5462$	$K_h = 4.4544$
7	515	2.7118	6.6	2.8	$\Sigma x_1 y = 179.826$	$C_x = 43.66\ e^{\frac{l}{3.2052}}\ e^{\frac{h}{4.4544}}$
8	550	2.7404	7.0	2.4	$\bar{x}_2 = 1.7125$	$R = 0.8949$
9	510	2.7076	6.6	2.0	$\Sigma x_2 = 27.4$	$\sigma = 0.1734$
10	470	2.6721	6.2	1.6	$\Sigma x_2^2 = 57.765$	$F = 26.1296 > F_{0.01}$ (2, 13) $= 6.7$
11	420	2.6232	5.8	1.2	$\Sigma x_2 y = 68.3422$	$F_{(l)} = 34.0938 > F_{0.01}$ (1, 13) $= 9.07$
12	360	2.5563	5.4	0.8	$\Sigma x_1 x_2 = 131.153$	$F_{(h)} = 2.9285 > F_{0.25}$ (1, 13) $= 1.45$
13	270	2.4314	4.9	0.5		
14	165	2.2175	4.0	0.6		
15	95	1.9777	2.8	0.95		
16	40	1.6021	1.8	1.1		

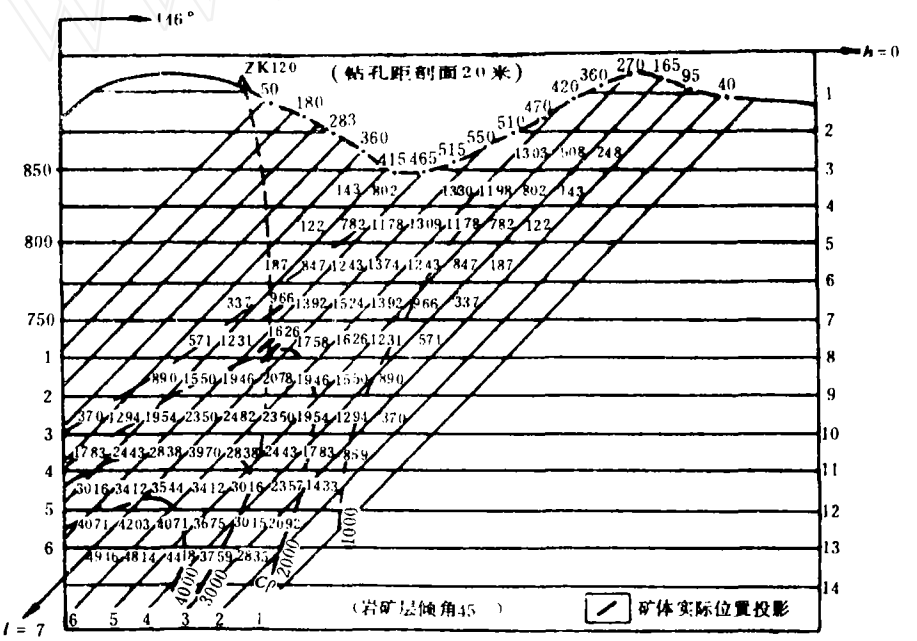

图6　多字沟80线Cu含量趋势延拓剖面

C_p—成矿浓度带界面（>2000 ppm）

以上试验均为含矿异常。下面再举一无矿异常例子（图7），颇有意思。中条后山地区有一水系沉积物异常，Cu元素流长850米，含量为50～500ppm，500～1000ppm，最高2000ppm，伴生Mo异常10ppm，但无前缘元素Zn，As异常。经岩石测量圈出Cu元素原生异常，其形态规整，梯度显著，浓集

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

中心明显，但亦缺少前缘元素异常。经剖面延拓，建立双指数函数方程为：

$$C_x = 53.5797\, e^{\frac{l}{4.176}}\, e^{\frac{h}{-26.1627}}$$

h 在方程中为显著变量，但扩展系数 K_h 为负值，说明场源极大值定位在地表剖面上半空间，即 Cu 量由地表向深部呈双指数函数规律递减，故推断该异常可能为一围矿晕尾部异常。延拓结果与异常特征及检查验证结果一致。

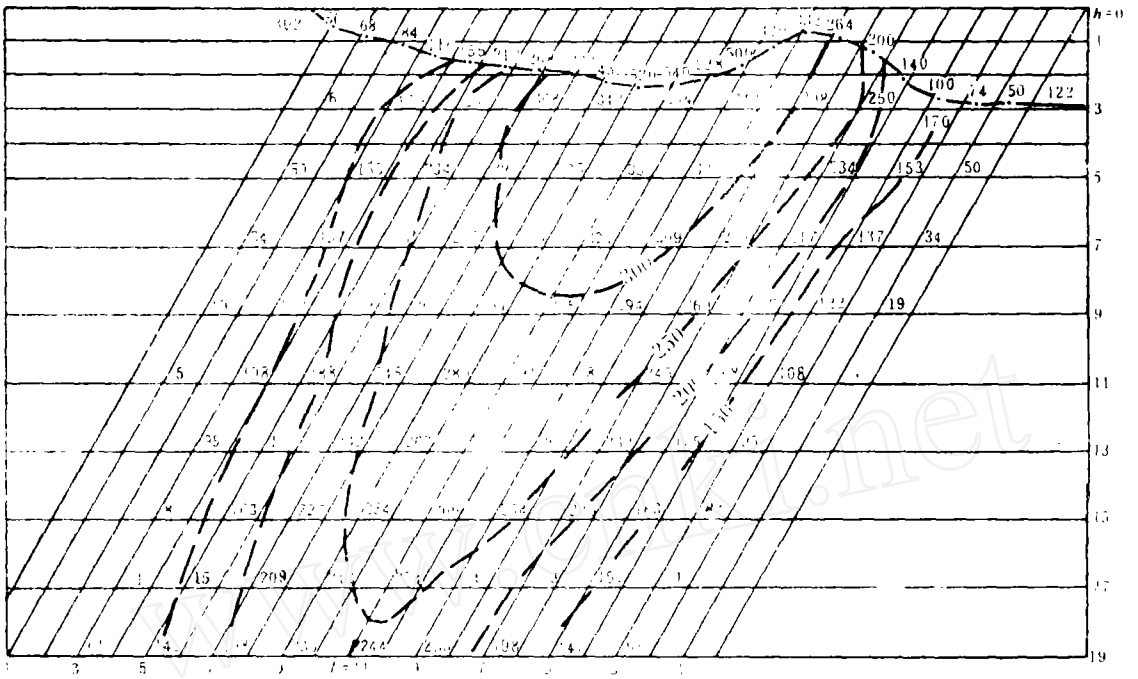

图7　中条后山Ⅱ—2号异常Cu量趋势延拓剖面

（拟合度为71.86%）

讨论及结语

众所周知，元素原生分带结构是由不同元素序列表征的。虽然在原生晕形成过程中受着许多因素与作用的控制，但元素原生晕分带显然是元素随成矿溶液迁移的结果。矿上晕的横向分带是一种扩散分带，而轴向和纵向分带实质却是反映矿液在运移过程中元素的沉淀分带。所以，C．B．格里戈良等认为，分带性体现在不同元素相对含量的最大值在空间中处于不同位置上，提出以分带指数（一定水平截面上某元素的金属量与所有指示元素金属量之和的比值）为依据排定分带序列。这就是说元素原生晕分带结构实质上是沿轴向和纵向方向在不同位置上由不同元素形成许多沉淀（浓集）中心而构成。这些浓集中心无疑可以看作不同指示元素的场源（极大值）。所以笔者认为元素原生晕分带结构不管多么复杂，但在原生晕中对同一种指示元素而言，也象主要成矿元素那样，由场源（各个元素的沉淀中心）向围岩方向在横向上以扩散作用为主，在轴向上是扩散叠加渗滤作用的结合，其金属含量变化亦应服从双指数函数规律。据此，提出以下几个问题讨论，可能具有一定的地质找矿意义。

1．除对主要成矿元素进行回归统计外，也可对矿上元素进行回归分析延拓计算，以确定不同元素含量最大值所处位置，大致排定元素垂直分带序列。图7实例证明，利用本文理想数学模型对异常剖面进行上延或下延回归分析均可。

2．在异常不同部位作数条垂直横切延拓剖面，再据延拓剖面作出不同中段（标高）水平断面图，追踪异常三度空间变异趋势，可为解释评价异常提供立体概念。

3．可对原生化探异常进行三维空间延拓试验。因为对于具有空间系统变异的矿致原生异常来说，每个

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

样品观测值实质上都是三维数据。所以应试用本法进行三元回归分析，以图了解金属分布的全部型式。

化探异常延拓方法不依赖于经验评价指标，强调异常自身垂直变异规律，认为成矿元素含量向深部明显呈双指数规律变富是矿致异常的根本特征，是区分工业矿化与分散矿化的定性标志，所圈出的趋势剖面中的成矿浓度带对于指导探矿无疑是一种有力的暗示。该法使用条件简单，在圈定整个异常形态的基础上，只要做1～3条精测横剖面，对岩石样品进行定量分析即可，适用于原生异常检查评价。但由于原生晕形成机制相当复杂，形成理论尚不完善充分，所有矿致异常金属含量变化肯定服从一定规律，但是否完全遵循双指数函数规律不敢断言，因此，此法尚需与其它方法配合验证，目前尚处初步试验阶段，需在实践中不断充实完善。

主要参考文献

[1] 秦皇岛冶金地质进修学院编：《现代成矿理论及勘查地球化学汇编》，第一、二、三、四集，1981

[2] H．E．霍克斯等（谢学锦译），《矿产勘查的地球化学》，地质科学院物探研究所印，1974

[3] 地质部情报研究所编译，《化探资料选编》一、二、三、四集，1974～1981

[4] 吴锡生，《化探讲座》，宁夏地质局物探队科技情报组印，1980

[5] 云南地质局物探大队编，《云南物化探》，1977年第5期

[6] 福建地质局科技情报室编，《数学地质》（一）、（二）

[7] 中国科学院地质研究所编著，《数学地质引论》，地质出版社，1977

[8] 小乔治S．科克等，《地质数据统计分析》上、下册，科学出版社，1978

[9] 孙作为等，《物理化学》，地质出版社，1979

元素背景值计算的几个问题

——与李清同志商榷

蒋　志

李清同志在《元素背景值计算问题探讨》[1]一文中，论述了柯氏检验、偏度与峰度检验在处理化探数据中的应用，无疑地具有实际意义，这里不再赘述。不过，就笔者所见，在该文的后半部份，还有值得商榷的地方。下面是笔者的一些浅见，提出来供讨论。

1．元素含量所遵循的分布问题　该文指出了“同一批数据既符合算术正态分布，又符合对数正态分布时”[1]的现象。原则上，随机数据所遵循的分布必须是图形一致或类似的分布。而正态分布与对数正态分布的图形在大多数场合下并不相似，只有在对数均值m较大、对数标准差s较小时的对数正态分布才趋近正态分布。此时，随机变量x_i的对数可表示为：

$$\begin{aligned}\ln x_i &= \ln(e^m + \Delta_i)\\ &= m + \ln(1 + \Delta_i e^{-m})\\ &\simeq m + \Delta_i e^{-m} \qquad (1)\end{aligned}$$

式（1）的最后结果是因m较大、s较小时，只有Δ_i值较小时才有实际意义，而展开近似得到。从式（1）左端看，是随机变量$\ln x_i$服从正态分布，即x_i服从对数正态分布；从式（1）的右端看，是变量$\Delta_i = x_i - e^m$服从正态分布，即x_i服从正态分布。在理论上，式（1）所示的是x_i表面上服从对数正态分布，实质上服从正态分布，并非是x_i既服从正态分布，又服从对数正态分布。在实际上，这样的数据通常按正态分布处理，而不按对数正态分布处理。

2．算术平均值和几何平均值问题　该文指出，元素含量平均值“一般按算术计算偏大，按对数计算偏小”，并解释为“由于算术平均值受边界含量影响较大，尤其样品数较少时，个别异常含量点的加入可使算术平均值明显偏高”[1]。由于算术平均值$\overline{x}$和几何平均值$\overline{x}_g$的表示式分别为：

$$\overline{x} = (x_1 + x_2 + \cdots\cdots + x_n)/n \qquad (2)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net