

地球化学异常解释和评价方法

— 《习题集》 —

吴郁彦 译编

长春地质学院

地球化学找矿教研室

一九八八年三月

前

言

这是一本为研究生和短训班准备的化探课程实践性教材。材料取自 А. П. 索洛夫夫和 А. А. 马特维耶夫合编的 “ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СБОРНИК ЗАДАЧ ” (1985)。这原是莫斯科大学地质系地球化学专业所用的习题集, 1985 年经苏联高教部审定批准作为高等院校地质专业通用教材使用。译编本习题集时, 根据国内 “地球化学找矿” 课程的现行教学体系, 在结构上作了较大的变动, 具体内容也根据实际需要, 有所选择。

我国高等教育正面临深化改革的新形势。为了提高教学质量, 一方面需要不断吸收国外先进科学技术充实和更新教学内容。另一方面还需要改进教学方法, 从加强实践性教学环节入手, 提高研究问题和解决问题的实际能力。编印这本习题集的主要目的就是为了满足化探课程教学的上述需要。

随着我国化探方法在各种矿产普查工作中的广泛应用, 大量异常需要及时研究并作出客观的评价, 我们相信本教材所介绍的在苏联已经全面实施异常定量描述和定量研究方法, 对于国内从事地球化学勘查实际工作的同志们来说, 也有重要的学习和借鉴意义。

目 录

一、地球化学场基本参数及其应用	(1)
(一) 基本概念和基本计算式	(1)
(二) 例题和习题	(15)
二、原生晕的解释和评价	(47)
(一) 基本概念和基本计算式	(47)
(二) 例题和习题	(57)
三、次生晕的解释和评价	(96)
(一) 基本概念和基本计算式	(96)
(二) 例题和习题	(106)
四、分散流的解释和评价	(130)
(一) 基本概念和基本计算式	(130)
(二) 例题和习题	(135)

附 表

一、地球化学场基本参数及其应用

(一) 基本概念和基本计算式

地球化学场是指用元素含量描述的地质空间。按照维尔纳茨基规则，元素在地壳中普遍存在并且不断迁移，地球化学场任何一点的元素含量总是大于零，元素含量的变化不仅与空间座标有关，而且与时间座标有联系，也即

$$C_x = f(x, y, z, T) > 0 \dots\dots\dots (I - 1)$$

在地壳的研究可及范围内，元素的分散状态大大超过浓集状态。因而地球化学场绝大多数测点的成矿元素含量是接近于克拉克值 (C_k)，仅在稀少的条件下是显著偏离于克拉克值水平。为了描述地球化学场中这两种有区别又相互联系的地段，采用了地球化学背景场和地球化学异常场的概念。局部地球化学背景值 (C_0) 可由远离异常地质相同地段的元素含量平均值 (或众数值) 确定。在矿床附近，成矿元素及其伴生元素含量偏离于局部地球化学背景值，这就是地球化学异常。金属矿床可以理解为有用组分含量达到工业利用意义的地球化学异常。苏联萨弗伦诺夫最早提出有关金属矿床原生晕、次生晕、分散流的概念。

地球化学找矿是通过地球化学测量的途径进行，这就是通过系统采样和样品分析，研究地球化学场中元素含量的分布和变化，依据所发现的地球化学异常达到找矿的目的。由于地球化学异常的数

量远远多于工业矿床存在的数量。同时，在许多情况下工业矿床并不都是与显著的强异常在一起，很弱的异常有可能是深埋藏的大型矿床的指示。因此，正确地划分和评价地球化学异常成了地球化学找矿的关键性问题。

地球化学测量可以在岩石圈、生物圈、大气圈中进行。当前金属矿床地球化学普查主要是采用各种固相介质（岩石、土壤、水系沉积物）为取样对象的地球化学测量方法。对于原生晕、次生晕和分散流的定量解释准则已有相当详细的研究。

为了估计地球化学测量中的误差并在分析地球化学数据时进一步考虑这些误差，应当对原始资料的质量进行检验。

地球化学取样的质量是通过重复取样进行检查，重复取样的工作量应占总量的3%。由于地球化学取样中误差是对数正态分布，计算系统误差应依据样品含量的对数值。

$$\Delta_{\text{系}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg C_{i1} - \lg C_{i2}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \left(\frac{C_{i1}}{C_{i2}} \right) \dots \dots \dots (I-2)$$

式中：n——检查样点数； C_{i1} ， C_{i2} ——第一次和第二次取样的样品分析结果。

查出系统误差的反对数便可得到含量本身的系统偏差 $\delta_{\text{系}} = \text{ant} \lg \Delta_{\text{系}}$ 。 $\delta_{\text{系}}$ 表示第一次的结果系统地比第二次大多少倍。当 $\delta_{\text{系}}$ 值在0.95至1.05时，可以认为无系统偏差。如果 $\delta_{\text{系}}$ 超出0.9~1.1范围，这种系统偏差应当予以排除，为此可用代数方

法从全部 $\lg C_i$ 中减去系统偏差 $\delta_{\text{系}}$ 。

地球化学测偶然偏差的计算需要采用修正后的含量值 C_{i1}' 。

$$\Delta_{\text{偶}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times n}} \sum_{i=1}^n (\lg C_{i1}' - \lg C_{i2}) = \frac{1}{\sqrt{2 \times n}} \sum_{i=1}^n \lg \left(\frac{C_{i1}'}{C_{i2}} \right) \dots$$

..... (I-3)

查出该值的反对数就是所求的平均偶然偏差 $\delta_{\text{偶}} = \text{antlg} \Delta_{\text{偶}}$ 。

据苏联 1983 年出版的化探规范，对松散物取样的偶然偏差不可大于 1.6，对基岩取样时，不得大于 2，否则就认为地球化学测量不合格，必须尽快查明原因。

如果不考虑地球化学测偏差的大小，依据化探资料所作的任何结论都不能被认为是可靠的。

地球化学场中元素的分布是不均一的，即使是地质和景观都是相同的地段元素含量也是有变化。元素含量的波动既有自然因素，也有人为因素。在背景地段元素含量波动幅度较小并且具有随机性质。与此相应，背景地段元素分布的统计特征可以采用各种含量值的样品频数（或频率）来表示。

在地质单一的地段，元素背景含量的频率分布接近于正态的函数：

$$y = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}} \dots\dots\dots (I-4)$$

式中： $\bar{x}$ —数学期望均值； S —标准离差； $y = n_i$ 频率。

一般认为成矿元素的背景含量分布接近于对数正态分布。这 (I - 4) 式中的 x 值应取对数, 两个特征参数分别用 $\tilde{x} = \overline{\lg C_x}$ 和 $S_{\lg}$ 取代。

根据正态分布规律, 以 $\bar{x} + 3S$ 为背景含量上限值时, 可以包含背景含量样品总数的 99.86%。以此为异常下限, 错误地把背景样品划分为异常的可能性是非常小的。因此, 当背景含量为正态分布时, 对于单个的 (孤立的) 元素含量偏离点来说, 异常下限适宜采用下式:

$$C_a = \bar{x} + 3S \dots\dots\dots (I - 5)$$

当背景含量为对数正态分布时, 则相应改用下式:

$$C_{Ax} = \tilde{C} \cdot \epsilon^3 \dots\dots\dots (I - 6)$$

式中: $\tilde{C}$ —含量几何平均值; $\epsilon = \text{ant } \lg S_{\lg}$ —标准因子。

矿致异常的特点是它们都产在各地段的有利地质构造中, 而且各元素的偏高含量在一条测线的若干个点上或者在若干条相邻的测线上是关联的, 这些特点是只因背景的随机起伏的假异常所没有的。因此, 如果元素偏高含量可在 m 个相邻点上追索到, 最好根据 m 数依次降低下限 C_a 值, 以区分出弱异常。其公式是:

$$C_a = \bar{x} + 3S/\sqrt{m} \quad (\text{正态律}) \dots\dots\dots (I - 7)$$

$$C_A = \tilde{C} \cdot \epsilon^{\sqrt[3]{m}} \quad (\text{对数正态律}) \dots\dots\dots (I - 8)$$

如果两个相邻点的含量偏高, 可以近似地取 $C_{a2} \geq \bar{x} + 2S$ 或

或 $C_{A_n} \geq \tilde{C} \cdot \varepsilon^2$ 作为异常值；如果 $m \geq 4$ ，取超过背景 + 1.5 S 的值就足够了；当 $m \geq 9$ 时，就应取 $C_{A_n} \geq \tilde{X} + S$ 或 $C_{A_n} \geq \tilde{C} \cdot \varepsilon$ 为异常值。

地球化学背景场的基本参数背景值和标准离差，以及与之相应的异常下限（背景上限）值可以采用概率格纸图解法求得。

概率格纸也可以用于评估样品分析的和地球化学测量总体的系统偏差和均方差。

地球化学场的标准离差 S 是由天然离差（元素含量自然波动） $S_{\text{天然}}$ 和技术离差（测量偏差） $S_{\text{技术}}$ 联合决定的：

$$S = \sqrt{S_{\text{天然}}^2 + S_{\text{技术}}^2} \dots\dots\dots (1-9)$$

反映元素含量自然波动的 $S_{\text{天然}}$ 对于地球化学研究有着重要意义。只要确定了 S 和 $S_{\text{技术}}$ 之后，就可求得 $S_{\text{天然}}$ 。

由于 S 与 $S_{\text{技术}}$ 有关，异常下限、异常的面积和外形都受到地球化学测量技术精度的影响。如果提高测量的精度就可以降低地球化学场的标准离差和异常下限值，同时增大异常面积和异常衬度，从而提高圈定异常的可靠性。在取样方法不变的条件下，天然离差是随样品的重量增大而减小，与测量的精度并无关联。

异常衬度是衡量异常清晰程度的地球化学指标，对于弱异常来说，描述异常清晰程度要考虑到背景场的标准离差大小，因此计算衬度适宜采用下式：

$$r = \frac{\lg C_{\text{极大}} - \lg C_0}{S \lg} = \frac{1}{\lg \varepsilon} \lg \left(\frac{C_{\text{极大}}}{C_0} \right) \dots\dots\dots (I-10)$$

除了元素含量极大值 ($C_{\text{极大}}$) 外, 描述地球化学异常强度的重要参数还有线金属量 ($M, M\%$), 面金属量 ($P, M\%$) 和地球化学储量 (Q, T)。

在测点等距的条件下, 线金属的计算可用下式:

$$M = \Delta x \left(\sum_{x=1}^n C_x - n C_0 \right) \dots\dots\dots (I-11)$$

在测点和测线均为等距的条件下, 面金属量的计算可用下式:

$$P = 2l \Delta x \left(\sum_{x=1}^n C_x - n C_0 \right) \dots\dots\dots (I-12)$$

或是: $P = 2b \bar{M}$ 。

式中: Δx —测线上采样点距; $2l$ —测线间距; n 和 N —分别为计算线金属量和面金属量时异常样点数; $2b$ —异常总长; $\bar{M}$ —线金属量平均值。

用下列计算式可以获得同样结果:

$$M = 2a (\bar{C}_x - C_0) \dots\dots\dots (I-13)$$

$$P = S (\bar{C}_x - C_0) \dots\dots\dots (I-14)$$

式中 $2a$ —异常沿测线的宽度; S —异常面积 M^2 ; $\bar{C}_x$ —异常范围内元素含量算术平均值; C_0 —元素背景值。

当测点和测线不等距时，线金属量和面金属量的计算需采用下式：

$$M = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2} \right) (C_1 - C_0) \dots\dots\dots (I-15)$$

$$P = \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_{j+1} - y_{j-1}}{2} \right) M_j \dots\dots\dots (I-16)$$

式中：\$X_{i+1}\$ 和 \$X_{i-1}\$ 为与 \$i\$ 点相邻两点的沿侧线起点的距离位置；
\$y_{j+1}\$ 和 \$y_{j-1}\$ 为与 \$j\$ 线相邻两侧线沿基线起点的距离位置；\$n\$ — 参与计算线金属量的样点数；\$m\$ — 参与计算面金属量的测线数。

如果测线不垂直于异常的长轴，需要通过角度修正才能获得实际线金属量，其修正式如下：

$$M_{\text{实际}} = M \cos \alpha^{\circ} \dots\dots\dots (I-17)$$

式中 \$\alpha^{\circ}\$ 为测线与异常轴法线的夹角。

而金属量的 \$P\$ 值的大小与地球化学测量比例尺无关，也就是说不会由于取样网密的不同而发生 \$P\$ 值的实质性变化，但是其数值的精度将随着比例尺的增大而提高。

在地球化学研究时，要注意区分地球化学指标的参数性质和非参数性质。参数性指标具有客观的量值，其数值的精度将随着研究精度的提高而提高，例如，某岩体的元素含量平均值 (\$\bar{C}\$)，某地壳背景值 (\$C_0\$)，地壳的元素丰度值 (\$C_k\$)，地球化学异常的线金属量 (\$M\$)，面金属量 (\$P\$)，元素内生活动性指数 (\$\lambda\$)，

外生活活性指数 σ 等。非参数性指标不能精确测定，其数量大小会随研究精度的提高而发生变化，例如，异常圈定面积会因异常下限值的改变而变化，异常含量平均值会因异常边界的改变而变化。某些非参数性地球化学指标具有重要的工艺意义，例如矿体中的金属平均含量（因边界品位而变化），又如异常的圈定面积。但是对于地球化学找矿方法理论发展具有基础意义的是参数性指标。

计算参数性指标均值 $\bar{x}$ 时，都要依据概率指出该估值的置信区间：

$$\bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (I-18)$$

式中：n—样品数；t—与指定的置信水平有关的系数，当置信水平要求为 $\pm 15\%$ ，而n数量足够大时，可取 $t=1$ 。由附表Ⅳ可知，当置信水平为 5% 时， $t=f(n)$ ，如果 $n > 60$ ，则 $t \cong 2$ ($t_{.5\%} = 1.96$)。

在化探实际工作中，当数据量小时，常常采用简易的方法，依据极差 ($R = X_{\text{极大}} - X_{\text{极小}}$) 和系数 β 估算标准离差 (S)。 β 值因样品数而有变化，具体数值可从附表Ⅳ中查得。标准离差的简易估算式如下：

$$S = \beta (X_{\text{极大}} - X_{\text{极小}}) \dots\dots\dots (I-19)$$

当元素含量是对数正态分布时 标准离差的简易估算改用下式：

$$S_{1g} = \beta \cdot 1_g \frac{C_{\text{极大}}}{C_{\text{极小}}} \dots\dots\dots (I-20)$$

$\bar{x}$ 和 S 是反映各种地质体中元素分布特征的最基本参数，即使两个相同类型的地质体之间这两个参数总是存在一些差别，为了判断两个地质体之间 $\bar{x}$ 和 S 值有无显著性差别需要进行统计检验。

两个地质体元素分布差异的显著性可用 F 检验法。如果两个地质体的样品数分别为 n_1 和 n_2 ，标准离差为 s_1 和 s_2 ，可以先按下式计算出 F 值：

$$F = \frac{s_{\text{大}}^2}{s_{\text{小}}^2} \dots\dots\dots (I-21)$$

然后依据 n_1 和 n_2 数值从附表 V 中查显著性边界值 ($F_{\text{表}}$)。如果 F 计算值大于表中显著性边界值 ($F_{\text{表}}$)，可认为差异显著，反之 $F < F_{\text{表}}$ 则被认为差异不显著。当 n_1 和 n_2 的数量都是足够大时， $F > 3$ 就可认为是差异显著。

当两个地质体的离散度相近时，为了评估它们之间均值 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$ 的差异显著性需要采用 t 检验法。 t 值的计算采用下式：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \dots\dots\dots (I-22)$$

t 检验法的显著性边界值见附表 IV，当 $t > t_{\text{表}}$ 时，可认为两个地质体的均值存在显著性差异，反之则认为无显著性差异。

$$T = \frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{12} \dots\dots\dots (I-25)$$

式中： m_i —重复数。从附表Ⅳ可以查到依据 $\sum \Delta^2 + T_x + T_y$ 计算的秩相关系数临界值。如果该计算值等于或低于下边界值是表示具正相关性；如果等于或大于上边界值则说明具负相关性。

秩相关系数也可以用于非元素含量性指标的相关性评估，例如两组成矿元素沉淀序次的比较。

在许多情况下，地球化学异常中元素含量之间有无相关性是判断异常性质的重要依据。

当进行多个地球化学异常之间或是同一矿带不同标高截面之间元素相关性的对比，而样本数量又较小时，相关系数差异的显著性检验可以利用附表 IX。

多种元素的相关性可以用相关系数矩阵表和圆周图形反映相互联系的性质和强度。

当两组样品数 n_1 和 n_2 都很小时，两组相关系数无显著差异的边界值变得很大，以致元素含量相关系数在异常对比和评价工作中往往降低了利用意义。但是如果采用多元的方法进行异常和地质体的对比，即使不很大的相关系数也可以参与分类研究中的应用。伏洛彼耶夫（1973）提出相似的地球化学异常的一种比较方法，就是计算两个异常反映各自特征的相关矩阵之间的相关系数。

在覆盖的成矿区依据上置盐晕、气晕或生物地球化学晕普查被掩埋的矿床时，强化弱异常的衬度具有重要意义，因为当松散盖层

很厚时，这种弱异常有可能是大型矿床的反映。在依据原生晕普查深埋藏的盲矿体时，也有一个如何强化很弱的矿上晕的问题。

对原始数据进行移动平均，是发现天然的和人为的干扰所掩盖的弱异常 ($x < 3\sigma$) 的最简单方法。沿测线移动的平均值按下式计算：

$$X_i = \frac{1}{2n+1} \sum_{j=i-n}^{i+n} x_j \dots\dots\dots (I-26)$$

沿测线移动平均一次包含的点数通常为奇数 ($2n+1$)，一个移动窗口同时可包含2、3条或更多的测线。移动平均的实质是通过降低地球化学场中随机分量的干扰，达到增强在相邻几条测线和相邻几个测点连续出现的弱异常的目的。其结果可以将依据原始数据难以划分的弱异常显示出来。将每个测点的一些元素按其共生组合关系进行含量的累乘也可以达到增强弱异常的效果。通常是把这两种方法结合起来使用。

有时，进行成矿元素含量的累乘是为了“浓缩信息”，减少化探成果图的数量。用具有不同地球化学特征的两组元素含量累乘积的比值作图也是很有用的。它可以用来反映矿田的水平分带，或是成矿区域剥蚀水平的差异。化探数据量比较大的时候，元素含量的移动平均和累乘需要借助于电子计算机。

在完成找矿地球化学测量的工作过程中，地球化学人员应当经常用统计概率的观点审视所获得的各种结果。例如，以 $Ca = \bar{x} + 3s$

为异常下限时，应该懂得在所划分出的异常样点中包含有属于背景场的高含量点，这种虚假的异常可能占测点总数的 $100 - 998.6 = 0.14\%$ 。

对所选择测网密度可能发现某种大小异常的概率 P 作评估是有一定的意义的。

沿测线连续观察发现走向不明的线型地质体（矿脉、矿层）的概率计算式如下：

$$P = \frac{2b}{\pi l} \dots\dots\dots (1-27)$$

式中 $2b$ — 地质体的长度； $2l$ — 相互平行的测线的间距。

通过测点取样发现面积为 S 的异常的概率，可用下列近似式进行计算：

$$P = 1 - e^{-S/\Delta S} \dots\dots\dots (1-28)$$

式中： $\Delta S = \Delta x \times 2l$ — 测网的网格面积； Δx — 测线上的点距。

找矿工作最初阶段的地球化学测量的目的在于发现大型矿床，而中小型矿床以及单个矿体那是属于以后化探工作的勘查目标。如果将矿床规模按储量数值的十进位进行分级，小型、中型、大型矿床之间储量比例为 $1 : 10 : 100$ 。各类矿产大型矿床的储量规模参见附表 II。

当计算化探工作预期成果时，要考虑到发现各级规模矿床的不

同概率，为此必须知道大、中、小型矿床之间的数量比例和储量比例关系（表1）。

表1 不同规模矿床之间的数量和储量比例关系

统计方式	矿 点	小 型	中 型	大 型
	$n \cdot 10^{m-1}_T$	$n \cdot 10^m_T$	$n \cdot 10^{m+1}_T$	$n \cdot 10^{m+2}_T$
以大型矿床为1的数量比例	343	49	7	1
不同规模矿床和矿点所占百分率	8575	1225	175	0.25
各级规模矿床数量的百分率	—	86	122	1.80
各级规模矿床储量的百分率	—	22	32	46

大型工业矿床的概念包含有地质的和经济的意义，它因技术发展、需求程度和市场行情而有变化。同时，同一级次矿床各种有用组分的储量和平均品位与化学元素的自然分布规律有紧密联系。克维雅特科甫斯基曾详细地研究了这种联系的地球化学性质。其标志之一就是成矿元素地壳丰度值与大型矿床储量数值具有显著的相关性。

每个工业矿床通常是由多个矿体所组成，并且与多个异常相联系，这些矿体和异常可以有不同的大小规模。对于复杂事件的概率需要采用下列计算式：

$$\pi = 1 - (1 - p_1)^{m_1} (1 - p_2)^{m_2} \dots (1 - p_i)^{m_i} \dots \dots \dots (I - 29)$$

式中： $p_1, p_2, \dots, p_i$ —— 发现不同规模级次异常的概率；
 i —— 规模级次序号； m_i —— 各级规模的异常数目。

(二)、例题和习题

I. 1 通过表 2 所列的初始测量和重复检查测量结果的对比，确定保赫德巴伊地段地球化学测量中 Sr 的系统偏差和偶然偏差。

题解：当分析灵敏度不足时，计算测量偏差需舍去两次测量均未报出含量的样点，例如 XII 线的 10、20、21、22、25、30 号点。剩下的样点中某次测量未能报出的含量给予光谱分析 S_r 报出值 $5 \times 10^{-3} \%$ 的一半即 $2.5 \times 10^{-3} \%$ 。

系统偏差的计算用 (I-2) 式，为此需要填写包含 $lg(\frac{C_I}{C_{II}})$ 值的中间数据表如表 3。