

籍成矿能分布判定原生晕 浓集中心的初步论证

徐 锡 华

摘要 根据成矿能理论,探讨矿床原生晕表现于能量消耗的理想空间分布模型,试图解释矿液运移方向及矿化中心定位等问题,当然,这种解释应具有地质—地球化学前提,并在某种程度上受一定的物理化学和热力学定律所制约。

关键词 成矿能 梯度 矿化中心

成矿能理论与方法是苏联学者据地球化学观测数据的多组分性所开创的一种全新的矿床原生晕研究途径,近年来,一直是学术会议与专业文献颇受重视的研究方向之一。早在1966年,苏联金属矿化探先驱Н·И·萨弗罗诺夫即以成矿作用的地质—地球化学概念为依据,以热力学数学模型为手段导出了成矿能计算公式。1971年Ю·Н·卡普科夫及Е·М·克维雅特科夫斯基对其公式进行了改进。Н·И·萨弗罗诺夫于1978年又出版了《成矿能与矿产普查》一书,对于成矿(晕)能的概念、方法及其在勘探与化探中的实际运用进行了详细的论述。成矿作用中能量消耗与矿石金属品位之间的数学关系是该书探讨的主要课题之一。本文旨在以此为基础探讨矿床(体)原生晕表现于能量消耗的理想空间分布模型,以有助于解决矿液运移方向及矿化中心定位等一类与找矿紧密相关的实际问题。笔者期望,这种以中、大比例尺原生晕数据为对象的定量解释途径不仅具备应有的地质—地球化学前提,尚且在某种程度上被一定的物理化学和热力学定律所制约。

一、成矿能原理

普遍认为,成矿元素在地壳中表现为岩石中的分散状态与矿石中的集中状态,而前者向后者的转变是通过成矿作用实现的。然而,元素逐步浓集致矿的过程不可能靠其分散作用自行产生,只能靠消耗各种形式的地球自然能即成矿能方可实现。诚然,要精确地表达出成晕成矿过程中的全部能量转换形式十分困难,很可能要借助于非平衡体系的不可逆过程热力学及统计力学等方法所必须的一系列参数方为通途。不过可以设想,成矿(晕)能与矿石和原生晕的克拉克浓度之间存在必然的联系。这一问题可以利用理想物质和理想过程的热力学定律在原则上给出正确的答案。

Н·И·萨弗罗诺夫认为成矿热液实际上是缔合溶液,其离子强度接近于零,热力学活

度系数接近于 1, 故可以假定为稀溶液进而服从理想气体的热力学定律。据盖斯定律, 其反应的热化学效应仅取决于反应产物的始态与终态性质而与中间过程无关。其次, 因含矿热液始态已达平衡, 诸组份均有取决于浓度与温度的最大嫡值, 故成矿过程可容假定为恒温过程。在上述假定前提下, 能够进行下面一系列热力学公式推导。

作为热力学势的自由能 $F = U - TS$ ① 在恒温过程, 其全微分表达式为 $dF = dU - TdS$ ②

因理想物质和理想过程内能增量 $dU = 0$ 故有 $dF = -TdS$ ③

对于平衡状态体系, 外界应对该体系消耗能量, 故有 $dF = TdS$ ④

由热力学第一、第二定律联合导出嫡增量为 $dS = R \ln K$ ⑤ 式中, $R = 8.314$ 焦耳 / 摩尔 · 开, K 为理想过程中某组分终态克分子浓度与始态克分子浓度之比 (假定为浓集过程)。对于参与过程的 M 摩尔理想物质, 其自由能增量是: $dF = MRT \ln K$ ⑥

设该理想物质某组份克分子浓度为 M , 全部组份克分子浓度为 ΣM , 故体系全部耗能为: $dF_{\text{全}} = \Sigma M \cdot RT \ln K$ ⑦

可以假定 $R \cdot T \cdot \Sigma M$ 均相同且为 1, 则 $dF_{\text{全}} = K \ln K$ ⑧ 亦可写成 $E = K \ln K$ ⑨

在 n 个元素参与的体系中, 单位体积矿石 (晕) 上的全部成矿 (晕) 能量为 $E_n = \sum_{i=1}^n K_i \ln K_i$ ⑩

按照上述定义, K 值是 $K = D \cdot C / D_0 \cdot C_0$ ⑪ 其中, D 、 D_0 为终态及始态物质密度, C 、 C_0 为终态及始态物质含量。

显然, K 值的近似表达式为 $K \approx C / C_0$ ⑫

由⑩式可知, 成矿元素 K 值将远远超过其余元素, 即在晕与矿的范围内, 成矿 (晕) 能实际上主要消耗在成矿元素的浓集上, 故经常用⑨式及⑫式在可以接受的误差范围内计算体系的全部能耗。从理论上讲, 成矿能计算具有全息效应, 而实际应用上, 只要计算那些与成矿元素密切共生的几种元素便足够了。

二、原生晕空间能量分布

研究原生晕空间的能量分布规律最终要归结为地球化学场的研究。场是物质存在的基本形式之一。而地球化学场是以所限定空间的每一个点都“具有随机性与结构性双重属性”为其特征的。随机场理论和克立格方法是描述地球化学场的理想模型。本文关于原生地球化学场的论证结果是在理论物质和理想状态的假定下, 对成矿作用产物所展现的静态空间结构的一种近似表达, 其能量空间分布用成矿能梯度这一参数相对于地质空间的座标函数加以描述。

按照能量守恒定律, 消耗地球自然能即成矿能的结果必然导致体系能量状态置于较高水平, 并直接表现为具有相应的浓度势。能耗与浓度呈正相关。能量消耗的程度可以用成矿能梯度 E 来表达, 现将其定义为成矿能量与其克拉克浓度 K 之比: $\bar{E} = E / K = \ln K \approx \ln C / C_0$ ⑬

⑬式的实践意义在于建立了成矿能量的空间分布与浓度场的联系从而使我们有进一步描述这一参数的空间分布规律。

浓度场是原生晕形成过程中经历了扩散作用与渗透作用的结果, 并且进一步地, “元素在渗滤与扩散作用中的行径并无根本的分歧。”以扩散晕机制为主的横向晕服从下面简单的指数关系: $C_x = C_B \cdot e^{ax} \dots\dots\dots(14)$

上式说明, 与矿体边界品位 C_B 相距 X 处的金属含量值 C_x 是依照成晕系数 a 的大小按指数规律下降的。指数函数经常被用于模拟地质过程。E·M·克维亚特科夫斯基在考虑了复杂的物质平衡, 动力学和水动力学方程组的前提下, 理想地认为在矿上晕和矿下晕范围内, 元素含量大体上服从下面的指数关系: $C_a = C_B e^{-b(z_a - z_B)} \dots\dots\dots(15)$

上式中 C_B 表示矿体边界 Z_B 处的含量, C_a 表示 Z_a 处的最低异常含量, 系数 b 与晕的形成过程有关。维斯捷利马斯和杰诺夫斯卡娅于1967年也曾指出, 构成某些化学元素在某些岩石中浓度基础的扩散过程的偏微分方程通常以指数函数为其解, 故对其趋势的拟合, 曾建议使用将多项式放在指数内的指数函数。

在一维一元素的情形, 可拟合为 $C/Co = e^{a_0 + a_1 x} \dots\dots\dots(16)$

即用成矿能梯度可表示为 $\bar{E} = a_0 + a_1 x \dots\dots\dots(17)$

其中, 系数 a_0 、 a_1 用最小二乘法求取 (下同)。此式表明, 一次指数型函数大体上可以判断成矿能梯度的改变程度, 从而指出化学元素的浓集趋势。

对于一维多元素的情况, 则为 $\sum_{i=1}^n \bar{E} = \sum_{i=1}^n a_{0i} + x \sum_{i=1}^n a_{1i} \dots\dots\dots(18)$ 在实际应用上, 所选定的一组元素应当是密切正相关的。

二维一元素在实际应用中较为普遍, 用一次项拟合时, 其形如 $\bar{E} = a_0 + a_1 x + a_2 y \dots\dots\dots(19)$ 用二次项拟合时, 其形如 $\bar{E} = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \dots\dots\dots(20)$

下面将以20式为例作进一步的讨论。该式在 Z 平面上的投影是一系列二次曲线。根据众所周知的二次曲线类型判别准则, 不难确定其等能量梯度线图形。即当 $\Delta_2 > 0$, $\Delta_3 \neq 0$, $\Delta_1 \Delta_3 < 0$ 时, 该曲线为一椭圆, 即存在所期望的矿化中心。其中经坐标变换, 可获得椭圆方程的标准形式如下:

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_3 + a_5 \\ \Delta_2 = a_3 a_5 - \frac{a_4^2}{4} \dots\dots\dots(21) \\ \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_3 & \frac{a_4}{2} & \frac{a_1}{2} \\ \frac{a_4}{2} & a_5 & \frac{a_2}{2} \\ \frac{a_1}{2} & \frac{a_2}{2} & a_0 \end{vmatrix} \end{cases}$$

$$\frac{X'^2}{a_2} + \frac{y'^2}{b_2} = 1 \dots\dots\dots(22)$$

当此式用来描述矿床原生晕纵断面时, 其长轴表示矿液运移方向, 短轴表示扩散方向。

由场论可知,此“能量梯度”场为一数量场,以此可以导出向量场即新的梯度场方程:

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial P} = \frac{\partial \bar{E}}{\partial X} \cos \alpha - \frac{\partial \bar{E}}{\partial Y} \sin \alpha \dots\dots 23$$

该式表示原生晕空间任一点沿任意方向 P 其能量梯度的变化率。且其最大变化率即梯度用汉米顿算子 ∇ 表示为 $\text{grad } \bar{E} = \nabla \bar{E} \dots\dots 24$

$$\text{梯度模是 } |\text{grad } (\bar{E})| = \sqrt{(a_1 + 2a_3x + a_4y)^2 + (a_2 + a_4x + 2a_5y)^2} \dots\dots 25$$

$$\text{梯度方向是 } \text{tg} \alpha = (a_2 + a_4x + 2a_5y) / (a_1 + 2a_3x + a_4y) \dots\dots 26$$

从而确立了“成矿能梯度”的梯度场。梯度方向给出成矿能梯度值增加最快的方向,它永远与成矿能梯度等量线正交从而亦与浓度等量线正交并最终指向原生晕浓集中心部位,其反方向即对流扩散场线,而其变化率向着浓集中心趋近于零。

$$\text{由梯度场可继续导出另一个新的数量场即散度场: } \text{div} [\text{grad } \bar{E}] = \nabla \text{grad } (\bar{E}) = 2(a_3 + a_4) \dots\dots 27$$

该值为常数说明了梯度改变的恒定性,其地质含义可理解为向着原生晕浓集中心,其成矿能梯度值空间分布变化率的定向性。

以上公式推导表明,藉成矿能梯度表达原生地球化学场不仅可望查明成矿成晕过程的方向性特征,而且有可能实现矿化中心的定位,其中,寻求最大能耗部位是其根本出发点。

至于二维多元素用一次项拟合,可推定为 $\sum_{i=1}^n \bar{E} = \sum_{i=1}^n a_0 i + X \sum_{i=1}^n a_1 i + Y \sum_{i=1}^n a_2 i \dots$
至于三维多元素用多次项拟合的情形可妨此类推。

三、卡林金矿床成矿能概算

推出这一算例的目的在于进一步阐明成矿能计算原理及其分析,至于成矿能梯度值空间分布规律的趋势拟合不准在考虑假定条件的前提下实现,故此略之。

美国卡林金矿床是赋存于志留纪和早泥盆纪碳酸岩建造内的近地表、低品位、大规模的微细浸染型金矿床。据研究,主要含矿组分来自碳酸岩地层本身,其次是附近的酸—中酸性侵入岩,后者主要发挥“热泵”作用。故本例以未矿化罗伯茨建造诸元素含量作为“始态”,其矿化的罗伯茨建造诸元素平均含量作为“终态”,兹将成矿能、成矿能梯度的计算结果列表如下,其中,成矿能使用假定单位体积表示。

表中围岩与矿石平均含量分别指罗伯茨建造非矿化与矿化样品的平均含量,其数据引自于 A. S. Radtke。成矿能正值示带入,负值示带出。现将其结果提供如下分析:

①在矿石形成的总能耗中,带入大于带出,其带出成矿能只占全部能量的 1%。其中, Ca、Mg、Sr 显示带出并相当于成矿过程中方解石、白云石的带出和其余元素包括 SiO_2 的带入。

②在带入成矿能总能耗中,单位体积金矿石的形成能耗为 67.40 假定单位。其中, Au 占 51%, Hg 占 27%, Sb 占 12%, As 占 8.5%, 其他元素只占 1.5%。这表明成矿元素以及

卡林金矿床成矿能计算表

元 素	围岩平均含量 Co	矿石平均含量 C _B	浓集克拉克值 K	成矿能梯度 E=lnK	成矿能 E=KlnK	能量比例 %
Si %	13	35	2.7	1.0	2.7	
Al %	1.5	3.3	2.2	0.8	1.7	
Fe %	0.6	1.8	3	1.1	3.3	
Ca %	22.9	2.5	1 / 0.2	-2.2	-20	74 (-)
Mg %	2.6	1.3	1 / 2	-0.7	-1.4	5 (-)
K %	0.7	1.6	2.3	0.8	1.9	
Na %	0.02	0.04	2	0.7	1.4	
P %	0.02	0.04	2	0.7	1.4	
S %	0.13	0.91	7	1.9	13.6	0.2
C %	0.3	0.4	1.3	0.3	0.3	
As ppm	4	480	120	4.7	574	8.5
Au ppm	<0.02	11	550	6.3	3470	51
B ppm	15	70	4.7	1.5	7.3	
Ba ppm	150	2200	14.7	2.7	40	0.6
Cr ppm	30	60	2	0.7	1.4	
Cu ppm	9	35	4	1.4	5.5	
Ga ppm	5	6	1.2	0.2	0.3	
Hg ppm	0.08	25	312.5	5.7	1795	27
Mn ppm	125	160	1.3	0.3	0.3	
Ni ppm	12	40	3.3	1.2	3.9	
Zr ppm	90	140	1.6	0.5	0.8	
Zn ppm	14	185	13.2	2.6	34	0.5
Ti ppm	810	1700	2.1	0.7	1.6	
Sr ppm	620	150	1 / 4.2	-1.4	-6	22 (-)
Sb ppm	0.8	130	162.5	5.1	827	12
Mo ppm	< 2	7	3.5	1.3	4.4	
Pb ppm	< 7	30	4	1.4	5.5	
Sc ppm	1	2	2	0.7	1.4	
Σ					+ 6740 - 27.4	

与之密切共生的元素消耗能量甚大,对卡林型金矿床,只需计算 Au、Hg、As、Sb便足够了。

③成矿能梯度 $\bar{E}$ 与成矿能 E 具有相似的变化顺序,只是 K 值较大的成矿元素其 $\bar{E}$ 被显著压抑。一成不变的是,成矿能梯度值仍然被成矿元素占有较大份额。其好处在于不同元素之间可以进行对比。

四、结语

本文旨在阐明成矿能原理并以此进一步探讨籍成矿能梯度表达原生地球化学场的可能性,其应用价值尚有待于大量实测资料之验证。以成晕能量为综合指标圈定成矿远景地段的例子已在 Н. И. 萨弗罗诺夫的专著 取得令人满意的结果。实践表明,与其构思复杂模型并引入不可靠的参数,莫如降低拟合标准并选择实测可行的参数。不过,在应用本文导出的浓集中心定位公式中,介质连续以及一个矿化中心的前提仍然是需要考虑的。

参 考 文 献

- (1) Н. И. Сафронов 《成矿能与矿产普查》《化探资料选编》地质矿产部情报所 1985, 11
- (2) Г. А. Вострокнутов 《岩石化数据预测—普查解释的新综合性准则》物化探译丛1984, 第1期。
- (3) 于崇文 地球化学的理论体系与方法论《地球科学》1986, 7。
- (4) A. S. Radtke 等《内华达州卡林金矿床容矿岩石和矿石中的主要元素与微量元素》金矿床地球化学勘查理论和方法译文集 1984, 11。
- (5) 简明数学手册 复旦大学数学系等编上海教育出版社 1977, 6。
- (6) Н. И. Сафронов 原生分散晕的理论问题 摘自《金属矿床地球化学探矿论文集》(3) 中国工业出版社 1965。

THE DISCRIMINATION OF THE PRIMARY HALO CENTRE BY ORE-FORMING ENERGY DISTRIBUTION

Xu Xihua

(Tian jin Geological Academy, MMI)

Abstract

The spatial distribution of ore-forming energy of primary haloes is studied in terms of ore-forming energy principles methods and the transverse halo diffusion equation. The results show that the migration direction of ore-forming fluid solution and primary halo concentration centre might be recognized by means of mathematical statistics model related to ore-forming energy. The author has also discussed in the paper the secondary trend surface of ore-forming gradient from the viewpoint field theory. The calculation and analysis about ore-forming energy of Calin gold deposit is provided in the end as an illustration.