

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

试论成矿成晕和成矿成晕信息及其找矿应用

陈 履 安

(贵州省地质矿产局地质科学研究所, 贵阳)



通过对成矿成晕过程物质和能量转化的热力学分析和研究, 从信息的本质上探讨了熵变、焓变和信息量的关系; 将工程热力学函数熵引入成矿成晕过程的研究, 提出了成矿成晕熵的概念, 试将其作为成矿信息的能量指标, 推导出了成矿成晕体系有关微量组分的成矿成晕熵的一般表达式为 $E_{\text{成矿(或成晕)}} = RT_e \left(\sum_j n_j \ln X_j - \sum_{j>0} n_{j,0} \ln X_{j,0} \right)$

从原生晕到次生晕, 初步建立了熵法评价地球化学异常的原则方法, 并试图开发和利用此种成矿成晕信息于化探找矿和地质研究等领域中。

一般矿床, 特别是热液矿床都可视为由矿源、矿液源和热源组成的成矿晕体系在一定物理化学条件下发生物质能量转化的最终结果。显然, 成矿成晕(原生晕)过程是一种特殊的物质能量转化过程, 即矿质富集的过程。这一过程必将留下成矿的物质和能量信息。因此, 提取成矿成晕的能量信息, 对揭示矿床成因, 指示成矿客体, 寻求深部盲矿, 可能具有重要意义。

苏联H. N. 萨弗隆诺夫(Н. И. Сафронов)^[1]等人曾提出“成矿能量”的概念, 并应用于勘探和化探中, 取得了重要的成果。然而, 他们所论的“成矿能量”是通过类比得到的一种假定的成矿能量, 物理意义不甚明确, 且未阐明成矿能量与成矿信息之间的本质联系。笔者对成矿成晕过程物质能量转化的热力学分析与研究, 从信息的本质上探讨了熵变、焓变与信息量的关系, 从而引入热工热力学函数熵(有效能)(exergy), 提出了成矿熵和成晕熵的概念, 将其应用于成矿成晕的研究, 以其作为化探中提取成矿成晕信息的能量指标, 初步建立了熵法评价地球化学异常、找矿的原则方法, 试图开发利用这一成矿成晕信息, 为地质研究和找矿勘探寻求新的途径。

一、熵函数的基本特性^[2-8]

如所周知, 物质能源的有用性是和它所处的环境状态密切相关的。热工热力学中表示这种能量有用性的尺度就是熵。其定义为: 在物质体系和外界环境达成平衡的过程中能够从体系或环境取得的最大有用功。因此, 对于给定状态的体系, 只要它和环境存在物理的、化学的差异, 它就有熵。

对于一个物质流稳定流过的开口体系, 如图1。若不考虑动能和位能, 当具有焓和熵分别为H和S的物质流在P=P₀、T=T₀下稳定流过体系, 体系吸收热量Q, 对外界作有用功W, 流出物质与环境达成平衡, 其焓和熵分别为S₀和H₀, 环境的温度和压力分别为T₀和P₀。

假定过程为可逆过程，则体系对外作最大有用功 W_{\max} ，其能量平衡方程为：

$$H + Q = H_0 + W_{\max} \quad (1)$$

过程的熵变可表示为：

$$S - S_0 = Q/T_0 \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得：

$$W_{\max} = H - H_0 + (S - S_0) T_0 \quad (3)$$

根据熵的定义，即得：

$$E = H - H_0 + (S - S_0) T_0 \quad (4)$$

从(4)式可见，熵、焓均为状态函数，故体系的熵为体系相对于环境的状态函数。

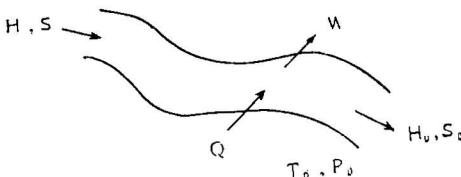


图 1 稳定流动的开口体系的熵

Fig. 1 Analysis on the exergy of opening system of steady flowing

若为不可逆过程，则体系对外作有用功为 W ，体系由于内部不可逆过程产生一个熵增量 ΔS_v ，则其能量平衡和熵平衡方程分别为：

$$H + Q = H_0 + W \quad (5)$$

$$S - S_0 = Q/T_0 + \Delta S_v \quad (6)$$

由此可得，体系由于不可逆因素引起的有用功损失即内熵损失 I 为：

$$I = W_{\max} - W = T_0 \Delta S_v \quad (7)$$

可见熵损失和不可逆过程引起的熵增成正比。

已知孤立体系中不可逆过程的熵变 $\Delta S_{\text{不可逆}} > 0$ ，可逆过程的熵变 $\Delta S_{\text{可逆}} = 0$ 。而由(4)式可得，体系从一种状态变化到另一种状态时，其相对于同一环境的熵变 ΔE 为：

$$\Delta E = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (8)$$

式中 T_0 为环境温度， ΔH 和 ΔS 分别为体系从一种状态变到另一种状态时的焓变和熵变。因为 ΔH 实为恒压变化时体系吸收的热量，故(8)式右边第一项可称为体系由吸热式放热所引起的外致熵变；第二项 $-T_0 \Delta S$ 可称为体系由于内部不可逆过程引起的内致熵变。

因此，对于孤立体系，体系无热量的吸收和放出，即 $\Delta H = 0$ ；且 $\Delta S_{\text{固有}} \geq 0$ ；又 $T_0(K) > 0$ 。故得 $\Delta E_{\text{固有}} \leq 0$ ；此即“孤立体系熵永不增大”。可见，和过程方向性的熵判据一样，熵可作为孤立体系过程方向性的判据。这就是孤立体系中的熵增原理相应的熵减原理。

综上所述，熵具有如下重要特性：(1) 熵是联系体系和环境的状态函数。体系和环境二者的状态一经确定，给定状态所具有的熵就被确定。因此，体系的熵是表征体系和环境之间状态差异的量。(2) 熵是能量价值的参数。和能量相比，能量包括有效能(熵)和无效能(耗)，而熵是有效的能，它是推动体系变化的真正动力的量度。本文将要讨论的成矿成晕过程的实现，可归结为成矿成晕熵的作用。(3) 熵和熵具有对应关系。由于熵减和熵增的对应关系，根据后述的信息量与负熵的紧密关系，可以推断，正熵(或熵增)与信息也有着紧密的联系。因此，笔者认为，熵不仅在能源科学和热力学上有重要意义，而且在比较自然客体、研究客观信息、揭示自然规律方面也具有重要意义。

二、成矿成晕(原生)过程中物质和能量转化的热力学简析^[9,10]

从母岩→成矿母岩→矿床(晕、体)的过程，其每一步都是由矿质较均匀分散、含量较低到矿质相对富集、非矿质相对贫化的过程。显然，这对于我们所研究的矿质组分来说，是一个由相对无序到相对有序的富集提纯过程。热力学研究表明，在无外助外阻的情况下， $\Delta G_{\text{总}} < 0$ ；

$\Delta S_{\text{混集}} > 0$ 。而前述矿质富集的过程是混合过程的逆过程，则有 $\Delta G_{\text{提纯}} > 0$ ； $\Delta S_{\text{提纯}} < 0$ 。根据前节所述的熵变与焓变的对应关系，可得 $\Delta E_{\text{提纯}} > 0$ 。故上述成矿过程是不可能自发进行的。

要上述过程得以发生，必须获得能量，改变体系的温度、压力和环境，必须有成矿流体的参加，改变体系的物质能量状态，从而构成一个新的体系，使体系发生包括上述过程在内的一系列过程，以促成成矿成晕过程的实现。即造成成矿体系在成矿温度和压力下达到 $\Delta G_{\text{成矿}} < 0$ ；或者说，使成矿体系和成矿环境介质（构成一个巨大的孤立体系）的总熵变大于0。因而，促成了“矿源岩加成矿介质（或流体）再加上热能→矿床（体、晕）加残余流体加贫化的母岩再加上废热”的成矿过程得以发生。对这一过程所作的熵分析和焓分析的简单图解如图2所示。

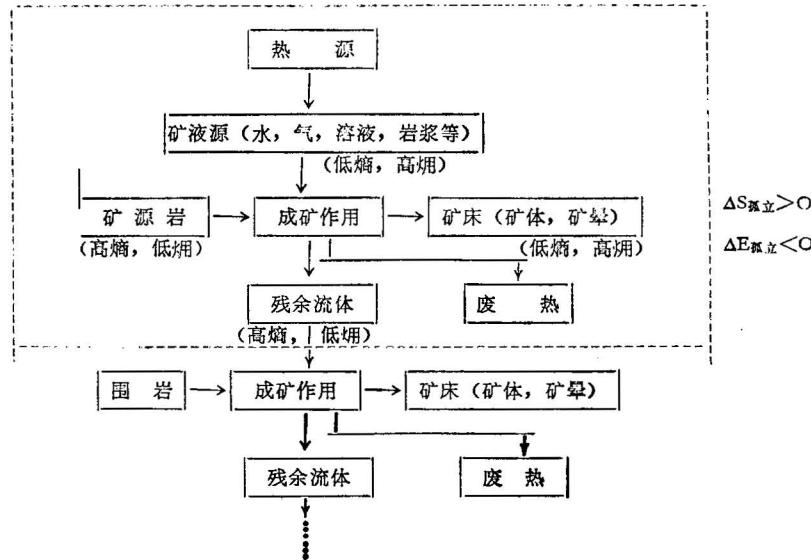


图 2 成矿成晕过程的熵分析和㶲分析的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of entropy analysis and exergy analysis in the ore-forming and halo-forming processes

从图2可见，总体说来，上述成矿过程中，体系 $\Delta S_{\text{孤立}} > 0$ 或 $\Delta E_{\text{孤立}} < 0$ ，故成矿作用得以发生。我们知道，将一稀溶液浓缩提纯，得到的浓溶液和残余溶液二者的熵低于原来的稀溶液的熵，其㶲高于原来的稀溶液的㶲。因此，在矿床或矿晕中，与成矿有关组分的㶲相对于矿源岩也是低熵和高㶲的；而残余流体相对于进入流体的物质和原始成矿流体二者是高熵低㶲的。从这个意义上讲，成矿流体在成矿过程中似乎起着“收集”和“提取”㶲的作用，以其熵增或㶲减来补偿从矿源→矿体和矿晕的熵减或㶲增，从而保证整个过程熵增大于0或㶲减大于0。

成矿和（或）成晕后的残余流体携带成矿元素及其它元素继续运移，在围岩中扩散渗透，并与之作用，“污染”围岩而继续成晕。并且，随其携带的元素的种类和数量的不同，而在不同的地质和物理化学条件下显示出不同的成矿成晕特征。如此继续下去，可形成矿床序列，或在矿床的成矿流体的运移方向上形成元素的带状分布，此时不仅造成了围岩矿物组成和结构的变化，同时使成矿有关组分带入围岩和围岩中某些组分被带出，改变围岩的元素分布，特别是微量元素的分布，从而形成原生晕。即造成了成矿成晕岩石与未成矿成晕岩石之间的状态差异。

三、成矿成晕㶲及其与成矿成晕信息的关系

信息是物质的普遍属性，它与物质和能量密不可分。因此，成矿信息必定与成矿物质和能量

有某种确定的关系。显然，现行的地球化学找矿方法多是研究成矿成晕物质信息的方法。然而，物料、能量、信息三者是物质三种须臾不可分离的属性，因此，在成矿物质中必然存在成矿成晕的能量信息。

早在40年代，信息论创始人K.香农和控制论创始人N.维纳等人就从不同角度提出了信息(量)与熵的定量理论，得出了“信息即负熵”的重要结论。信息即负熵，是对有序和组织程度的量度。而我们讨论的成矿成晕过程，正是从无序到有序的过程。将矿源岩和矿床(体、晕)来比较，后者相对于前者，成矿及其有关组分的熵减小而焓增大，即熵增为负值(负熵)，焓增为正值(正熵)。由于熵的概念较抽象，用熵减(负熵)来反映成矿信息不太直观，且不便把矿体、晕体跟矿源联系起来，同时，熵函数与焓函数具有紧密严格的对应关系，因此，我们可以把成矿成晕熵(有效能)作为成矿成晕信息的数量化指标。它可明显地体现成矿物质、能量、信息三者的统一。

根据吉布斯自由能(G)的性质，恒温恒压下体系吉布斯自由能的减少等于体系对外所能作的最大有用功。若温度、压力为环境的温度、压力，根据熵的定义，(4)式可变为 $E = \Delta G_{T_0, P_0}$ 。

已知理想溶液于恒温恒压下的混合自由能

$$\Delta G_m = RT \sum n_i \ln X_i$$

就体系和环境分别考虑，则

$$E = \Delta G_{T_0, P_0} = \Delta G_{T_0, P_0}^{\text{体系}} - \Delta G_{T_0, P_0}^{\text{环境}} \quad (9)$$

$$E = RT_0 \sum_i n_i \ln X_i - RT_0 \sum_{i,0} n_{i,0} \ln X_{i,0} \quad (10)$$

式中R为气体常数， $n_{i,0}$ 为环境中组分i的mol数； X_i 和 $X_{i,0}$ 分别为体系和环境中组分i的mol分数； T_0 为环境温度。

对于1mol大气或稀的水溶液，可视为理想气体或理想溶液，设其主体组分为i，微量组分为j，体系和环境的主体组分基本相同，可得1mol大气或1mol水溶液的总熵为：

$$e = RT_0 \sum_j X_j \ln (X_j / X_{j,0}) \quad (11)$$

对于多元固相体系，当其主体组分和环境的基本相同时，则其相对于环境的熵，原则上也可以用(11)式表示。

我们定义：在使矿源岩变为矿体或晕体的过程中，使与成矿有关组分富集的有效能称为成矿熵(对于矿体)或成晕熵(对于晕体)。它实为矿体或晕体中与成矿有关组分相对于矿源岩的相应组分的熵。假定二者的主要造岩组分为i，与成矿有关组分为j，则对于矿源岩即围岩(即晕叠加在矿源岩上)的情况，因为： $\sum_i X_i \gg \sum_j X_j$ ， $\sum_{i,0} X_{i,0} \gg \sum_{j,0} X_{j,0}$ ，即 $\sum_i X_i = \sum_{i,0} X_{i,0}$ ，故由(11)式可得单位体积岩石(如1dm³)的原生成晕熵为：

$$E_{dm} = NRT_0 \sum_j X_j \ln (X_j / X_{j,0}) \quad (12)$$

式中N为摩尔密度，假定二者的摩尔密度相等。

对于矿体或晕体与矿源(背景)主体组分不同的情况，根据(10)式得，矿体或晕体相对于矿源岩(背景)的总熵为：

$$E_a = RT_0 \left(\sum_i n_i \ln X_i + \sum_j n_j \ln X_j - \sum_{i,0} n_{i,0} \ln X_{i,0} - \sum_{j,0} n_{j,0} \ln X_{j,0} \right) \quad (13)$$

因上式括号中第1和第3项与成矿有关组分无关，可以不予讨论，此处只讨论 $E_{\text{成矿}}$ 中与成矿有关的部分，即：

$$E_{\text{成矿}} = RT_0 \left(\sum_j n_i \ln X_i - \sum_{j,0} n_{i,0} \ln X_{i,0} \right) \quad (14)$$

对于单位体积的矿体或晕体，其成矿成晕熵为：

$$E_{(\text{dm})^3 \text{ (成矿, 成晕)}} = RT_0 \left(N \sum_j n_i \ln X_i - N_0 \sum_{j,0} n_{i,0} \ln X_{i,0} \right) \quad (15)$$

由于矿晕的形成实际是与成矿有关的组分或元素在围岩中相对富集的结果，因此，我们把成晕熵理解为含矿晕围岩中成晕组分相对于未成晕围岩（背景）中相应组分的熵。它反映了成晕围岩与背景之间在与成矿有关组分方面的状态差异。故不论围岩是否是矿源岩，都可用成矿成晕熵表述与成矿成晕有关的信息。

对于次生分散晕，即晕源于矿的情况，虽然由矿体→次生晕，是熵增、熵减的，但晕体相对于无与成矿有关组分次生分散的地质背景而言，由背景→晕体是熵减、熵增的，而且实际找矿也是从背景到晕体再到矿体的，因此，我们也可以用晕体中与成矿有关组分或元素相对于背景中相应组分或元素的熵作为成晕熵，以其作为找矿信息。

四、成矿成晕熵的求法及应用实例

为了有效地运用成晕熵，对有关概念定义如下：

组分的摩尔熵：系指1mol含晕地质体中某组分j相对于给定背景中同一组分j, 0的熵。即：

$$e_j = RT_0 X_j \ln (X_j / X_{j,0}) \quad (16)$$

总摩尔成晕熵：系指1mol含晕地质体中所有成晕组分的摩尔熵之和。即：

$$e_a = RT_0 \sum_j X_j \ln (X_j / X_{j,0}) \quad (17)$$

则单位体积成晕地质体中成晕组分的总成晕熵为：

$$E_L = NRT_0 \sum_j X_j \ln (X_j / X_{j,0}) \quad (18)$$

（假定晕体和背景的摩尔密度相等）。

为了计算成矿成晕熵，必须通过地球化学研究，确定与成晕有关的矿源岩（或背景），然后对矿源岩和矿晕体按如下步骤来求得。

（1）对矿源岩作全分析以确定它的主要组分的重量百分含量；据此求得各组分的 $X_{i,0}$ 。

（2）测定矿源岩中与成矿有关组分的重量百分含量，据此和（1）的结果，换算成 $X_{i,0}$ 。

（3）根据各主要组分的 $X_{i,0}$ 和分子量，求岩石的平均分子量 \bar{M}_0 ，测定岩石的密度 D_0 ，进而求得摩尔密度 $N_0 = D_0 / \bar{M}_0$ 。

（4）对矿体和晕体进行和矿源岩（参照背景）一样的步骤。

（5）根据（12）式或（15）式，可得单位体积晕体的成晕熵。对于次生晕、分散流、水晕、气晕等分散晕，以相应地球化学背景为对照，其成晕熵原则上可按上述方法求得。

根据有关资料，我们取《浙江五部火山型铅-锌矿床地球化学特征的研究》（徐外生等，1981）为例，试用矿区主要岩石中微量元素的特征值来计算这些元素成晕熵的特征值。由于缺乏背景区和矿区主要岩石中常量组分的测定结果，为了简化计算，我们假定二者的主要造岩组分基本相同，岩石密度基本相同，故可根据（12）式计算成晕熵。因为对于一个具体矿床的矿晕的参照背景，

在作如上假设时，有 $X_{i,0} = (a_{i,0}/M_i) / \left[\sum_{i,0} (a_{i,0}/M_i) \right]$ 和 $X_{j,0} = (b_{j,0}/M_j) / \left[\sum_{i,0} (a_{i,0}/M_i) \right]$ 的关系（式中 $a_{i,0}$ 、 $b_{j,0}$ 分别为主体组分 i 和微量组分 j 在背景中的重要百分数），因此，有 $\sum_{i,0} (a_{i,0}/M_i)$ 为一常数，故 $X_{i,0} = (b_{j,0}/M_j)/K$ ；同样可得 $X_i = (b_i/M_i)/K$ （式中 K 为常数），因此对于给定元素，(12)式可写为：

$$E_{j(\text{dm})} = K' b_j / M_j \ln(b_j/b_{j,0}) \quad (19)$$

上式中 K' 为常数， $K' = N_0 R T_0 / K$ 。将有关数据代入 (19) 式，算得矿区中主要岩石中微量元素的成晕熵的特征值如表 1。

从表 1 可见，在第 1 种和第 2 种岩石中，铅和锌的成晕熵有很强的异常；当岩石中微量元素的

表 1 矿区主要岩石中微量元素成晕熵的特征值(单位: b_j 为 ppm; E_j 为 $K' = N_0 R T_0 / K$)

Table 1 Characteristic values of halo-forming exergy of trace elements in main rocks of ore area

元 素		Pb	Zn	Cu	Ag	Cd	Mn	Mo	Ni	Co	As	Ba	Hg* (ppb)
矿区背景平均值 b_j , b		35	85	38	0.5	1.5	1000	1	20	15	6	200	14
矿区异常下限值 b_j , 1		100	200	80	1	3	3000	3	40	20	10	300	20
矿区异常下限的成晕熵 E_j , 1		0.705	2.618	0.937	0.006	0.019	59.99	0.034	0.472	0.098	0.068	0.886	0.036
(1) 酸性 次火山岩	平均含量 b_j	522	1292	54	3.3	8.1	6544	8.3	13.8	<5	8.6	250	30
	$b_j/b_{j,1}$	5.22	6.46	0.68	3.3	2.7	2.18	2.77	0.35	—	0.86	0.83	1.50
	平均成晕熵 E_j	6.81	53.78	0.29	0.058	0.122	223.0	0.183	-0.08	—	0.04	0.48	0.118
	$E_j/E_{j,1}$	13.44	20.55	0.31	8.98	6.59	3.72	5.33	0.177	—	0.57	0.54	3.22
(2) 熔结 凝灰岩	平均含量 b_j	1048	2420	92	2.4	24.7	8951	2.9	18.3	<5	16.9	200	31
	$b_j/b_{j,1}$	10.48	12.1	1.15	2.4	8.23	2.98	0.97	0.46	—	1.69	—	1.55
	平均成晕熵 E_j	17.19	124.0	1.27	0.035	6.616	356.2	0.032	-0.032	—	0.232	—	0.122
	$E_j/E_{j,1}$	33.93	47.37	1.36	5.43	33.30	5.94	0.94	0.069	—	3.40	—	3.43
(3) 基性 熔 岩	平均含量 b_j	46	168	65	<0.5	3.1	2555	1.1	62	31.1	5.7	200	19.2
	$b_j/b_{j,1}$	0.46	0.84	0.81	—	1.03	0.85	0.37	1.55	1.56	0.57	0.67	0.96
	平均成晕熵 E_j	0.058	1.78	0.54	—	0.02	44.44	0.001	1.20	0.39	0	0	0.032
	$E_j/E_{j,1}$	0.115	0.68	0.58	—	1.11	0.74	0.032	2.53	4.01	0	0	0.91
(4) 凝灰 岩 类	平均含量 b_j	59	114	70	<0.5	1.5	1191	<5	<5	<5	2.8	<200	15.42
	$b_j/b_{j,1}$	0.59	0.57	0.88	—	0.5	0.4	—	—	—	0.28	—	0.77
	平均成晕熵 E_j	0.15	0.46	0.65	—	0	3.95	—	—	—	-0.03	—	0.07
	$E_j/E_{j,1}$	0.30	0.176	0.69	—	0	0.066	—	—	—	-0.38	—	2.06
(5) 沉积 岩 类	平均含量 b_j	46	122	38	<0.5	1.6	953	0.66	24.9	16.5	5.1	350	19.0
	$b_j/b_{j,1}$	0.46	0.61	0.48	—	0.53	0.32	0.22	0.62	0.83	0.51	1.17	0.95
	平均成晕熵 E_j	0.058	0.63	0	—	0.001	-1.83	-0.002	0.08	0.027	-0.007	1.50	0.03
	$E_j/E_{j,1}$	0.115	0.24	0	—	0.074	-0.30	-0.071	0.16	0.027	-0.11	1.69	0.90

* b_{Hg} 的单位为 ppm; E_{Hg} 的单位为: $10^{-3}RT_0N_0/K = 10^{-3}K^*$

含量在异常下限以上时，其有关元素的成晕熵和其异常下限的成晕熵的比 ($E_i/E_{i,1}$)，比相应元素含量与其异常下限含量的比 ($b_i/b_{i,1}$) 大；而在异常下限以下时，则前者 ($E_i/E_{i,1}$) 较后者 ($b_i/b_{i,1}$) 为小。因此，若根据岩石中微量元素的成晕熵来圈定异常和计算晕的强度，则反映的异常更灵敏、更清晰、更直观。在研究复杂和微弱异常的矿晕时更为有效。

五、成矿成晕熵在地质找矿中的意义^[12]

由于成矿成晕熵既是成矿成晕有效能，也是成矿信息的量度，又是描述矿体和晕体中与成矿有关组分与矿源岩或相应地质背景中这些组分的能量状态差异的量。因此，它在地质地球化学方面可有相当广泛的应用。(1)在岩石、土壤和水系沉积物的地球化学测量中，通过对已知矿床的矿、晕体中与成矿有关组分的成晕熵的组合、大小、分布特征的研究，获得成晕熵与矿体的关系，从而建立评价成晕熵异常的指标体系，指导寻找盲矿。(2)研究晕的分带性，确定晕的分带系列。通过对已知矿床（矿体）中成矿成晕分带性的研究，如自矿体向上向外，将垂直剖面分带分成若干中段：1, 2, ……n，以作为评价参照的标准（如相应背景或地表）为0中段，设不同中段中同一组分在晕体中的摩尔分数分别为 $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,n}$ ，则组分 i 在分带中 n 中段的成晕熵可表示为： $E_{i,n} = RT_0 X_{i,0} \ln (X_{i,n}/X_{i,0})$ 。通过比较可求得某组分成晕熵最大的中段，从而确定它们在成晕熵分带序列中的位置。同时可求得不同中段中所有成晕元素或组分的总成晕熵。根据已知同类矿床（体）的这种成晕熵分带序列和各中段的总成晕熵以及前缘和尾晕的熵特征和组合关系，可提供矿晕和矿体之间关系的信息。(3)研究成矿地质条件和地质体的含矿性。由于矿源一般是初步富集了成矿元素的岩石、地层、建造等地质体，因此这些地质体中与成矿有关组分的成晕熵，可作为判断地质体是否可能提供矿质作为矿源的佐证。(4)进行区域地质方面的研究。笔者曾在另文^[3]中指出，熵可反映优质环境和劣质环境的状态差异。而在地质历史的不同时期的同一地域，或同一地质时期的不同地域，其环境的质能状态不同，反映在微量元素的组成上，它们相对于给定的参照“环境”（背景）的熵就不相同。因此，通过对有关地层、环境相区等微量元素的熵的研究，有助于地层的划分，沉积环境的分析和古地理、古生态的研究。(5)通过成矿成晕熵的大小、强度和矿源规模的研究，可推断矿床储量的大小。(6)在水、气地球化学找矿中，用以评价异常，寻求熵与矿的关系。此外，还可用以作矿床的成因分析和矿液流向的推断等方面。因此，研究、开发、应用和解释这种信息，可望为地质找矿打开新的思路，开辟新的途径。

本文在成文过程中，承蒙中国科学院学部委员谢学锦教授的鼓励和帮助，谨此深表感谢之意。

参 考 文 献

- [1] Сафонов, Н. И. и. др., 1978, Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Недра.
- [2] 朱明善, 1988, 熵和能。自然杂志, 第5卷, 第4期, 第279—281页。
- [3] 陈履安, 1983, 论环境质量熵法评价。中国环境科学, 第3卷, 第1期, 第12—18页。
- [4] 南京大学物理化学教研组, 1979, 物理化学(上)。人民教育出版社, 北京, 第3版, 第181—225页。
- [5] 乙間末広, 1979, エクセルギー概念による環境汚染の熱力学解釈。公害と対策(日), 第15卷, 第4期, 第433—441页。
- [6] 杨东华, 1979, 熵和熵分析(上)。力学与实践, 第1卷, 第4期, 第22—26页。
- [7] 杨东华, 1980, 熵和熵分析(下)。力学与实践, 第2卷, 第1期, 第13页。
- [8] 廖晓垣, 1984, 有效能与节能。化学通报, 第5期, 第36—40页。
- [9] 陈履安, 1985, 生产、污染及其治理过程中物质能量转化的热力学分析。中国环境科学, 第5卷, 第1期, 第74—

77页。

- [C10] 玉野井芳郎, 1981, 经济学が無視した“負の生産”, 科学朝日(日)。第44卷, 第7号、第57—61页。
- [C11] 黎明, 1984, 论信息, 中国社会科学, 第4期(总28期), 第13—26页。
- [C12] 长春地质学院找矿教研室, 1979, 找矿方法。地质出版社, 北京。

THE ORE-FORMING AND HALO-FORMING EXERGY AND ORE-FORMING AND HALO-FORMING INFORMATION AND THEIR APPLICATION TO EXPLORATION OF ORE DEPOSITS

Chen Lu'an

(Institute of Geology, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Guiyang)

Abstract

Through a thermodynamic analysis and study of matter and energy conversion in the ore-forming and halo-forming process, the paper discusses the relationship between entropy change, exergy change and information from the nature of information. The author introduces the engineering thermodynamic function, exergy, to the study of the ore-forming and halo-forming process, proposes concepts of ore-forming exergy and halo-forming exergy, and extends them from the study of primary to the study of secondary halos. In the paper a general expression of ore-forming and halo-forming exergy of trace elements in the ore-forming and halo-forming system is given as

$$E_{(\text{ore-forming or halo-forming})} = RT_0 \left(\sum_j n_j \ln X_j - \sum_{j,0} n_{j,0} \ln X_{j,0} \right)$$

The principle and method for assessing geochemical anomalies by the exergy method have been established, and an attempt has been made to develop and apply the ore-forming and halo-forming information to geochemical exploration for ore deposits.

作 者 简 介

陈履安, 生于1942年11月, 1967年毕业于武汉大学化学系物理化学专业, 现任贵州省地质矿产局地质科学研究所高级工程师, 从事物理化学及其地学应用方面研究。通讯地址: 贵阳市北京路贵州省地质矿产局地质科学研究所。