

成矿物质来源的定量判别方法的探讨^{*}

李长江 徐有浪 蒋叙良

(浙江省地质矿产研究所, 杭州)

提 要: 热液矿床的成矿物质往往具有多源性。因此, 定量判别不同来源矿质的量比关系, 从而正确地识别矿床的主要成矿物质来源和成因机制, 是现代矿床学研究的关键性问题之一。本文给出了三元混合模式的同位素-成矿元素的比值型判别方法, 并给出了金银和萤石矿床成矿物质来源的定量判别应用实例。

主题词: 热液矿床 成矿物质来源 三元混合模式 定量判别方程

自从涂光炽^[1,2]提出许多矿床的形成具有多成因、多期次和成矿物质多来源的观点以来, 大量的矿床实例已证实热液矿床的多成因、多期次和成矿物质的多源性普遍存在。然而遗憾的是, 人们在矿床研究中, 遇到具有多解性或十分复杂的数据或资料时, 就往往以多成因和多来源观点作为终结性的认识。这种情况已屡见不鲜。因此, 不分主次地强调矿床的多成因和成矿物质的多来源, 对于探索矿床的形成规律和指导找矿, 并无实际价值。事实上, 在任何一个矿床或矿田, 都必定有其主要的成因机制和物质来源。造成这种现象的根本原因在于缺乏有效的方法来定量不同来源矿质的量比关系, 从而正确地识别一个矿床或矿田的主要成因机制。至于成矿活动的多期次或多阶段问题, 在细致的野外观察和室内研究基础上, 结合矿化时间(年龄)的研究, 已不难解决。

许多同位素和微量元素地球化学研究方法在探讨矿床成因和识别成矿物质来源方面已得到十分广泛的应用, 有关的研究报道见于各种地质文献。然而, 由于对许多成矿元素还缺乏直接的同位素示踪剂, 在以往的这些论著中, 应用同位素和微量元素对成矿物质来源的判别研究几乎都是属于定性分析。

可以确认, 在热液成矿过程中往往发生具有不同化学成分及不同同位素组成的物质互相混合, 如不同源区的热液混合或同一源区热液流经不同的地层岩石等等。这种混合就可能为成矿提供了不同来源的矿液或矿质, 从而导致了成矿物质或流体的多源性。本文基于这一前提, 在先前研究的基础上^[3~5]①, 建立了三元混合模式的同位素-成矿元素的比值型判别方程, 定量判别成矿物质来源。矿床研究实例和找矿实践证明这是一种定量不同来源矿质量比关系的有效方法。

^{*} 本文为浙江省自然科学基金资助项目(492008)部分研究内容

李长江, 男, 1951 年 8 月生, 高级工程师, 1981 年浙江大学地质系研究生毕业。主要从事矿床学研究。邮政编码: 310007

1993-11-13 收稿, 1994-6-28 修改回

①李长江, 1992, 中国萤石矿床同位素地球化学, 中国同位素地球化学

1 判别方程

如果把矿体或矿石中某种成矿元素含量和同位素组成看作是热液混合作用的产物,并且假设混合物生成后这些成矿元素的含量或同位素的组成没有受到各种反应或过程的改变,就可以通过一个简单的混合模式将其与源区成分联系起来。

设由 1、2、3 三个源区的物质以不同的比例 f_1 、 f_2 、 f_3 混合,形成的混合物的同位素组成如 x_m 、 y_m ,可由下列线性方程组确定:

$$\begin{cases} x_1 f_1 + x_2 f_2 + x_3 f_3 = x_m \\ y_1 f_1 + y_2 f_2 + y_3 f_3 = y_m \\ f_1 + f_2 + f_3 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

(1)中, x_i 和 y_i ($i=1,2,3$) 分别为三个源区中 x 和 y 同位素的组成。根据 Gramer 法则 ($|A| \neq 0$),该方程组的解为:

$$f_i = \frac{D_i}{|A|} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

其中 D_i 是以 x_m 、 y_m 、1 替换 $|A|$ 中第 i 列元素所得的行列式。故方程组(1)的解为:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{D_1}{|A|} \\ f_2 = \frac{D_2}{|A|} \\ f_3 = \frac{D_3}{|A|} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} |A| &= \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} & D_2 &= \begin{vmatrix} x_1 & x_m & x_3 \\ y_1 & y_m & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \\ D_1 &= \begin{vmatrix} x_m & x_2 & x_3 \\ y_m & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} & D_3 &= \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_m \\ y_1 & y_2 & y_m \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

又设 c_1 、 c_2 和 c_3 分别为三个源区中某种成矿元素的含量与元素 x 或 y 的含量的比值。如果成矿流体中的 x 或 y 组分主要是通过流体的溶滤作用从岩石中获得的,并假定在这个溶滤过程中,岩石中的某种成矿元素也以相同的速率被带入流体中,则由式(3)得:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2}}{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2} + \frac{D_3}{D_2} \cdot \frac{c_3}{c_2} + 1} \\ E_2 = \frac{1}{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2} + \frac{D_3}{D_2} \cdot \frac{c_3}{c_2} + 1} \\ E_3 = 1 - (E_1 + E_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中 E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 1、2、3 三个源区对成矿元素的供给比例。

以上是三元混合模式的成矿元素来源的判别方程。当某一源区物质对成矿过程的影响很小,以致可以忽略不计,即对于二元混合模式,源区 1 和 2 对成矿元素来源的供给比例可以表示为:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{1}{\frac{x_m - x_1}{x_2 - x_m} \cdot \frac{c_2}{c_1} + 1} \\ E_2 = 1 - E_1 \end{cases} \quad (5)$$

2 应用实例

2.1 金银矿床

2.1.1 浙江治岭头金银矿床 产于浙中(前寒武纪变质基底)隆起带遂昌断块北东边缘。矿体

围岩主要为前寒武系陈蔡群黑云斜长片麻岩、二长片岩、片麻岩等变质岩,其次为上侏罗统火山岩。矿体形态为脉状、似脉状。矿脉的矿物组成有银金矿、金银矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿及石英和蔷薇辉石等。金银矿物主要赋存于黄铁矿等硫化物和石英的晶隙或裂隙中。围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和蔷薇辉石化等。

以往不少研究者对治岭头矿床虽然作过多方面的研究,但对成矿时代、成矿物质来源和成矿作用机制等重要问题的认识,仍众说纷纭,莫衷一是。

该矿床已有的矿石矿物的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 两组比值连同成矿时期(假设为 $100 \times 10^6 \text{a}$)变质岩和火山岩的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值一并投在图 1^[5],矿石矿物的数据点介于变质岩和火山岩之间,呈一直线分布($n=30, r=0.97$)。由此表明,矿石矿物的铅同素组成与端员为变质

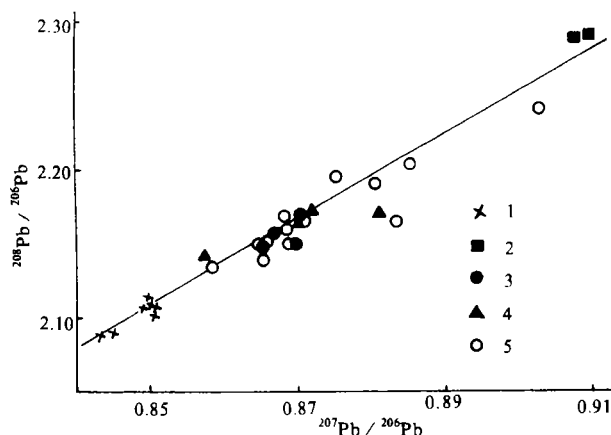


图 1 治岭头金银矿床矿石和岩石的

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 相关图

(资料来源见表 1)

1—火山岩(J_3-K); 2—变质岩($An-Ch$); 3—早期黄铁矿、方铅矿;
4—晚期黄铁矿、方铅矿; 5—未分期的黄铁矿、方铅矿

Fig. 1. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ versus $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ diagram of ore minerals and related rocks from the Zhilintou gold-silver deposit.

1—Volcanic rocks(J_3-K); 2—Metamorphic rocks($An-Ch$);
3—Early stage pyrite and galena; 4—Late stage pyrite and galena;
5—Pyrite and galena without being divided in stage.

岩和火山岩源铅的二元混合作用有关,并证实取成矿时间为 $100 \times 10^6 \text{a}$ 的假设是合理的。从图 1 可以看出,早、晚期黄铁矿及方铅矿之间的铅同位素组成差别并不大,因此取图中较集中的

17 个数据点的平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值来判别该矿床的成矿物质来源(表 1)。将表 1 数据代入式(5),求得 $E_1(\text{Au})=0.55, E_2(\text{Au})=0.45; E_1(\text{Ag})=0.15, E_2(\text{Ag})=0.85$ 。根据 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值也可由式(5)得到类似的结果,此处从略。

根据上述结果可以得出如下两点认识:(1) 成矿过程中,55%的金和 15%的银来自前寒武纪变质岩,45%的金和 85%的银来源于中生代火山岩;(2) 成矿年龄为 $100 \times 10^6 \text{a}$ 左右,并不是一些研究者所认为的主要矿化形成于晋宁期。

表 1 治岭头金银矿床的计算参数

Table 1. Calculation data for the Zhilintou gold-silver deposit

$x_m, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^{\text{①}}$ (矿石铅)	$x_1, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^{\text{②}}$ (变质岩)	$x_2, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^{\text{②}}$ (火山岩)	c_1 变质岩 ^③		c_2 火山岩 ^③	
			Au/Pb	Ag/Pb	Au/Pb	Ag/Pb
0.8711 ± 0.0059 (17)	0.9083 ± 0.0007 (2)	0.8482 ± 0.0030 (12)	9.9×10^{-5} (Au:187) (Pb:59)	2.7×10^{-3} (Ag:59)	5.0×10^{-5} (Au:1067) (Pb:363)	9.2×10^{-3} (Ag:1067)

括号内数字为样品数;① 根据许金坤等(1985,内部资料)、郑人来等(1986,内部资料)、徐步台(1988)^[6]等的铅同位素分析数据;② 根据许金坤等(1986,内部资料)、凌洪飞(1990,南京大学博士论文)、陈江峰(1986)、魏元柏等^[7]、徐步台、李长江等^[8]的岩石铅同位素分析数据和 U、Th、Pb 含量等资料计算的在成矿时期($100 \times 10^6 \text{a}$)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值;③ 根据刘英俊等^[9]、郑人来等(1986,1990,内部资料)、胡永和等(1989,内部资料)、李长江等^[5]等的岩石 Au、Ag、Pb 含量分析数据

2.1.2 浙江毫石银矿床 位于浙中隆起带与浙东裂陷带交接部位的晚侏罗世火山岩中。矿体呈脉状或似脉状。矿脉的矿物组合主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、自然银、辉银矿、石英、绢云母、长石及菱锰矿等。围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、菱锰矿化等。

该矿床 17 个矿石矿物样品的铅同位素组成相当一致,在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 相关图上,均落在以火山岩和变质岩源铅为端员的混合线上^[8]。由表 2 数据和式(5)计算得出,在毫石银矿床成矿过程中,97%($E_2=0.97$)的银来自中生代火山岩。

表 2 毫石银矿床的计算参数

Table 2. Calculation data for the Haoshi silver deposit

$x_m, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (矿石铅)	$x_1, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (变质岩)	$x_2, ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (火山岩)	c_1 变质岩	c_2 火山岩
			Ag/Pb	Ag/Pb
0.8532 ± 0.0014 (17)	0.9083 ± 0.0007 (2)	0.8482 ± 0.0030 (12)	2.7×10^{-3} (Ag:59) (Pb:59)	9.2×10^{-3} (Ag:1067) (Pb:363)

括号内数字为样品数;矿石铅同位素资料据徐步台、李长江等^[8],其余资料来源同表 1

2.2 萤石矿床

2.2.1 墨西哥科阿韦拉(Coahuila)州萤石矿床 墨西哥科阿韦拉(Coahuila)州的萤石矿床主要产于第三纪流纹质火山岩或微正长岩与白垩纪灰岩的接触带处或白垩纪灰岩中。前者矿体形态呈团块状或囊状,属交代型矿床;后者矿体形态为脉状或平缓的似层状,主要为充填型矿床。据 Kesler 等^[13]研究,交代型和充填型萤石矿床的萤石具有一致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,范围在

0.70762~0.70832 之间。因此,这里不进一步区分交代型和充填型矿床,而是把有关该地区萤石和有关岩石的锶同位素组成等资料综合列于表3。

根据式(5),对表3数据的计算结果表明,在科阿韦拉州萤石成矿中,91%~95% ($E_1 = 0.91 \sim 0.95$) 的氟来自第三纪火山岩,来自白垩纪灰岩的氟为 5%~9% ($E_2 = 0.05 \sim 0.09$)。

表3 科阿韦拉(Coahuila)州萤石矿床的计算参数

Table 3. Calculation data for fluorite deposit, Coahuila, Mexico

矿床	$x_m, {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ (萤石)	$x_1, {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ (岩浆岩)	$x_2, {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ (灰岩)	c_1 , 岩浆岩 F/Sr	c_2 , 灰岩 F/Sr
拜拉 (Paila)	0.70782±0.00013 (11)				
埃图拉 (El The)	0.70796±0.00006 (3)	0.70953±0.00220 (3)	0.70766±0.00007 (9)	55.0	0.5
皮科埃特雷奥 (Pico Etereo)	0.70794±0.00025 (8)				
恩坎塔德 (Encantade)	0.70796±0.00012 (5)				

资料来源:Kessler 等^[13];括号内数字为样品数

2.2.2 浙江杨家萤石矿田 位于浙中隆起带的武义白垩纪断陷盆地及其边缘,由数十个大、中及小型矿床组成。矿床围岩主要为晚侏罗世火山岩,其次是早白垩世沉积岩。矿体形态均为脉状。萤石的共生矿物主要为石英,其次有方解石、重晶石等。矿脉两侧围岩一般发育有不同程度的硅化、绢云母化、绿泥石化及粘土化、碳酸盐化等中低温热液蚀变。

该矿田典型矿床中主矿化阶段萤石的 ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ 值和 ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$ 值($80 \times 10^6 \text{a}$)介于前寒武纪基底变质岩与中生代火山岩、沉积岩或上地幔的 ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ 值($80 \times 10^6 \text{a}$)和 ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$ 值($80 \times 10^6 \text{a}$)之间(表4)。研究表明,萤石的锶和钕同位素组成受基底变质岩、盖层岩石(火山岩和沉积岩)和上地幔的三元混合体系所控制^[3]。将表4的数值代入式(4)计算,当对 c_i ($i=1,2,3$)取 F/Sr 值时得到: $E_1=0.78, E_2=0.17, E_3=0.05$;取 F/Nd 值时得到: $E_1=0.60, E_2=0.25, E_3=0.15$ 。计算结果表明,在杨家矿田萤石成矿过程中,60%~78%的氟来自赋矿岩石下伏的前寒武纪变质岩。这就较好地解释了为什么中国东南部70%以上的大型萤石矿床集中分布在浙中闽北前寒武纪变质基底隆起区^[3,4]。先前,李长江^①曾根据对中国东南部萤石矿源建造的研究,指出在绍兴-江山-邵武和宁波-丽水-政和之间的地区可望进一步找到大型的热液萤石矿床,并通过锶同位素混合模式和岩石的 F/Sr 资料进一步论证了上述地区的前寒武纪基底变质岩是萤石矿床的主要矿源层^[3]。该结论已为后来浙中变质基底隆起区的龙泉八都等大、中型萤石矿的勘查结果所证实。

由上述例子可以看出,三元或二元混合模式的同位素-成矿元素的比值型判别方法,对于定量研究热液矿床不同来源矿质的量比关系,探讨成矿作用机制和指导找矿都有重要意义。

① 李长江,1986,我国东南地区萤石矿源建造之初见,华东地质科技情报,第一期。1984年11月,华东地区非金属情报交流会演讲论文

表 4 杨家萤石矿田的计算参数

Table 4. Calculation data for the Yangjia fluorite orefield

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}^{①}$	x_m 萤石	0.7520 ± 0.0133	(9)
	x_1 变质岩	0.7940 ± 0.0596	(6)
	x_2 火山岩+沉积岩	0.7140 ± 0.0048	(24)
	x_3 上地幔 ^③	0.7039	
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}^{②}$	y_m 萤石 ^⑤	0.511902 ± 0.000010	(14)
	y_1 变质岩 ^⑥	0.512034 ± 0.000535	(7)
	y_2 火山岩 ^⑦	0.511340 ± 0.000128	(4)
	y_3 上地幔 ^⑧	0.512537	
F/Sr ^③	c_1 变质岩	5.14	(F:257, Sr:6)
	c_2 火山岩+沉积岩	1.78	(F:542, Sr:24)
	c_3 上地幔	0.83	
F/Nd ^③	c_1 变质岩	29.35	(F:257, Nd:7)
	c_2 火山岩	18.91	(F:542, Nd:4)
	c_3 上地幔	20.00	

括号内数字为样品数; ①除萤石外,均为成矿时期($80 \times 10^6 \text{a}$)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值; ②均为成矿时期($80 \times 10^6 \text{a}$)的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值; ③F、Sr、Nd 含量资料分别根据李长江和蒋叙良^[3]、黎彤^[10]、黄萱等^[11]、凌洪飞(1990)等; ④根据 Peng 等^[14], 中国东部第三纪玄武岩 16 个样品的 Rb-Sr 测试计算的在成矿时期的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值; ⑤根据韩文彬等^[12]的萤石 Sm-Nd 测试资料计算的在成矿时期的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值; ⑥根据凌洪飞(1990)的 Sm-Nd 测试资料计算的在成矿时期的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值; ⑦根据黄萱等^[11]的 Sm-Nd 测试资料计算的在成矿时期的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值; ⑧由现今测定值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR(0)} = 0.512638, ($^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR(0)} = 0.1967 及 $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{年}^{-1}$, 取 $t = 80 \times 10^6 \text{a}$ 时的计算值, 其余资料根据李长江和蒋叙良^[3]、李长江(1992)

3 几点说明

(1) 应用本文给出的量比方程判别热液矿床成矿物质来源时, 作为同位素示踪剂的元素与成矿元素在研究地区的岩石中的主要携带矿物应相同, 或者前者携带矿物的淋滤稳定性近似于后者携带矿物的淋滤稳定性。

(2) 对具有多阶段(或多期次)成矿特征的矿床, 如果不同矿化阶段之间在地质、地球化学及同位素地球化学等方面存在显著差异时, 则应分别对不同阶段的成矿物质来源进行判别。

(3) 一般应选择同位素分子之间质量差异较小的元素作为示踪元素, 如铅、锶、钆同位素等。因为, 当某一矿物从热液中沉淀期间, 只有质量差异较小的同位素分子之间才不会发生明显的分离, 矿物的同位素组成也不会因成矿过程中物理化学条件的变化而发生明显改变。这样, 矿石矿物的同位素组成才能反映出其晶出时成矿流体的同位素组成。

(4) 最后必须强调, 深入细致的野外地质观察, 样品采集的系统性和代表性以及测试方法的精确度, 是判别结果的准确性的基础。

参 考 文 献

- 1 中国科学院地球化学研究所. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1979, 403~417
- 2 涂光炽. 矿床的多成因问题. 地质与勘探, 1979, (6): 1~5
- 3 李长江, 蒋叙良. 浙江武义-东阳地区萤石矿床的锶同位素地球化学研究. 矿床地质, 1989, 8(3): 65~74
- 4 李长江, 蒋叙良. 中国东南部两类萤石矿床的成矿模式. 地质学报, 1991, 65(3): 263~274

- 5 李长江,徐步台,蒋叙良,胡永和.浙东南金银铅锌区域成矿作用的若干问题讨论.地质与勘探,1990,(6):1~8
- 6 徐步台.浙江绍兴-龙泉贵金属成矿带的稳定同位素地球化学.地质找矿论丛,1988,3(4):53~61
- 7 魏元柏,陈武,陈克荣.浙江天台大岭口银锌矿床稳定同位素研究.南京大学学报(地球科学版),1988,(1):203~213
- 8 徐步台,李长江,陈好寿.浙江毫石银矿床成矿年代学和同位素地球化学研究.矿床地质,1994,13(3)
- 9 刘英俊,孙承轶,沙鹏.浙江绍兴-龙泉隆起带中金矿床的成矿地球化学研究.地球化学,1986,(1):10~21
- 10 黎彤.岩石圈及其结构层的元素丰度.地质学报,1985,59(3):219~227
- 11 黄萱,孙世华,Depaolo D J.,福建省白垩纪岩浆岩的Nd、Sr同位素研究.岩石学报,1986,2(2):50~63
- 12 韩文彬,马承安,王玉荣等.萤石矿床地质及地球化学特征——以浙江武义矿田为例.地质专报(四.第18号),北京:地质出版社,1991,124
- 13 Kesler S. E., Ruiz J., Jones L. M. Strontium isotopic geochemistry of fluorite mineralization from Coahuila, Mexico. Chemical Geology, 1983,1:65~75
- 14 Peng Z L., Zartman R E., Futa K. Pb-, Sr-, Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China Chemical Geology, 1983,59:3~31

A DISCUSSION ON THE QUANTITATIVE DISCRIMINATION OF ORE-FORMING MATERIAL SOURCES

Li Changjiang, Xu Youlang and Jiang Xuliang

(Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, Hangzhou 310007)

Key words: hydrothermal deposit, ore-forming material source, ternary mixed model, quantitative discriminant equation

Abstract

Ore-forming materials of hydrothermal deposits are commonly characterized by multiple sources. Therefore, the quantitative discrimination of ore materials from different sources and, furthermore, the recognition of the principal ore material source and the genetic mechanism of the ore deposit seem to be one of the key problems in the ore deposit study. In this paper, an isotope-metallogenic element ratio type discriminant equation of ternary mixed model is proposed:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2}}{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2} + \frac{D_3}{D_2} \cdot \frac{c_3}{c_2} + 1} \\ E_2 = \frac{1}{\frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{c_2} + \frac{D_3}{D_2} \cdot \frac{c_3}{c_2} + 1} \\ E_3 = 1 - (E_1 + E_2) \end{cases}$$

where $E_i (i=1, 2, 3)$ represent the contributions of three source areas for ore-forming elements respectively, and

$$D_1 = \begin{vmatrix} x_m & x_2 & x_3 \\ y_m & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, D_2 = \begin{vmatrix} x_1 & x_m & x_3 \\ y_1 & y_m & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_m \\ y_1 & y_2 & y_m \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

in which c_1, c_2 and c_3 are respectively ratios of ore-forming elements to element x or y in rocks from each source area, whereas x_1, x_2, x_3, x_m and y_1, y_2, y_3, y_m are respectively isotopic ratios between ore minerals and rocks from each source area.

Some examples of applying quantitative discrimination are given in this paper, illustrating the sources of metallogenic materials for gold-silver and fluorite deposits.