

## 比值分析及其在伴生元素评价中的应用

赖应钱 黄慧玲

(广东省地质科学研究所·广州)

比值分析是利用伴生元素含量( $x$ )与主元素含量( $c$ )在矿石中的比值( $a=x_0/c_0$ ), 在矿物中的比值( $b=x_i/c_i$ )以及两者的比值(称比值系数  $k=b/a$ ), 对伴生元素赋存规律进行分析研究的方法。 $b$ 值和矿石中仅有一种矿物含某种伴生元素的  $a$ 值, 可确切了解伴生元素自身变化、富集规律及其在载体矿物中分布的均匀程度; 矿石中与各矿物相关联的  $k$ 值具有如下关系:  $k_1+k_2+\dots=1$ , 据此可确定伴生元素在各有关矿物中的分配情况和判断赋存有该种伴生元素的矿物是否全部查明。

关键词 勘探 伴生元素评价 比值分析



工作方法

在凡口铅锌矿床勘探期间(1956~1964), 笔者曾提出一种比值分析方法应用于伴生分散元素(镉、镓、锗)的评价<sup>①②</sup>, 效果较好。在1988~1989年补做该矿床伴生汞的工业评价时, 又应用了此法, 同样收到了良好效果。鉴于比值分析方法对评价伴生元素简便而有效, 现将此法及其应用效果作一综述, 供参考。

### 比值分析基本概念

诸多矿床, 尤其是多金属矿床, 除主要元素或组分具有工业价值外, 常伴生有多种可以回收利用的微量元素。在矿石中, 这些伴生元素常不呈独立矿物, 而呈类质同像或微晶颗粒存在于作为载体的主元素矿物中。通常, 在进行矿床工业评价时, 对矿石中的

主元素要作基本分析, 对伴生元素大多作组合分析, 此外还要配合一定数量的单矿物分析和精矿分析。本文介绍的比值分析, 是通过矿石的和矿物的化学分析资料进行对比研究, 以了解伴生元素的富集程度、含量变化、赋存关系和分配情况, 从而对其作出工业评价的方法。该法主要参数有3个, 即  $a$ 值、 $b$ 值和  $k$ 值。

$a$ 值是矿石中某种伴生元素含量( $x_0$ )与某一主矿物元素含量( $c_0$ )的比值( $x_0/c_0$ ), 其数据可从矿石的基本分析或组合分析中获得, 也可从专项研究用的矿石分析结果中获得。例如, 某件矿石样品的化学分析结果为含 Zn6.00%, 含 Cd0.0090%, 则  $a_{Cd/Zn}=0.001500$ 。

$b$ 值是矿物中某种伴生元素含量( $x_i$ )与某一主元素含量( $c_i$ )的比值( $x_i/c_i$ ), 主要从单矿物样品或精矿样品的分析结果中获得。例如, 某件闪锌矿单矿物样品分析结果为含

本文1992年10月收到, 1992年12月修改回, 于纯烈编辑。

①赖应钱, 应用比值分析方法研究伴生元素赋存规律的初步探讨, 广东地质科技情报, 1964(1)。

②黄慧玲, 多金属矿床伴生有用元素的评价工作方法, 广东地质科技情报, 1964(1)。

Zn54.00%，含Cd0.0800%，则  $b_{Cd/Zn} = 0.001481$ 。

$k$  值称比值系数，它是同一伴生元素与同一主元素在矿物中比值 ( $b$  值) 与在矿石中比值 ( $a$  值) 之比，即  $k=b/a$ 。例如，矿石中  $a_{Cd/Zn} = 0.001500$ ，矿物中  $b_{Cd/Zn} = 0.001481$ ，则  $k_{Cd/Zn} = 0.9873$  或 98.73%。

比值分析的目的是要从  $a$  值、 $b$  值和  $k$  值的关系中，获取与伴生元素赋存规律和工业评价有关的确切信息。一般来说，矿石的矿物组成越简单，比值分析过程越快捷，效果也越佳。因为矿石中每项主元素仅能代表 1 种载体矿物时，可无须进行其他换算，只要通过上述简单的比值分析，即可确定伴生元素与载体矿物之间的关系。凡口铅锌矿床即属于这类情况。该矿床矿石仅由 3 种主要金属矿物组成，即方铅矿、闪锌矿和黄铁矿。矿石中的 Pb、Zn、[S]<sup>3</sup> 项化学分析结果分别代表了这 3 种矿物在矿石中的相应含量，通过比值分析确定出的伴生元素与 Pb、Zn、[S] 含量间的关系，也就是确定有关伴生元素与矿石中方铅矿、闪锌矿、黄铁矿矿物之间的关系。

### 比值分析的实用意义

在比值分析中， $a$ 、 $b$ 、 $k$  3 个参数实用意义各不相同。

#### 1. $a$ 值

一般而言，伴生元素与主元素在矿石中的比值即  $a$  值，单独应用时其意义并不确切，只有在与  $b$  值相比较的基础上才显示出。 $a$  值可反映矿石中伴生元素如下 3 种情况中的任何 1 种：若  $a$  值等于或接近于  $b$  值，表明伴生元素仅赋存于该主元素组成的矿物中，此时  $a$  值的作用和意义与  $b$  值相同，可当作  $b$  值应用；若  $a$  值明显大于  $b$  值，表明伴生元素不止赋存于 1 种矿物中，

此时其意义只有通过比值系数  $k=b/a$  来确定；若  $a$  值无限大于  $b$  值，表明伴生元素与该主元素矿物之间不存在赋存关系，则  $a$  值本身无实际意义。所以，评价伴生元素时，必须做一定数量的单矿物分析或精矿分析以求得  $b$  值，否则仅凭矿石分析资料得出的  $a$  值很难确切表明问题。

#### 2. $b$ 值

$b$  值是代表载体矿物每含主元素 1% 时相应存在的伴生元素含量， $b$  值越大表明该种矿物含伴生元素越高。 $b$  值的实用意义首先在于它基本消除了主元素变化或单矿物分离不纯的影响，因此它比直接应用单矿物或精矿分析结果更能确切表明伴生元素自身的某些赋存规律。例如，在凡口矿床金星岭北部矿体中，Cd、Zn 均富集于矿体西段，两者空间位置重合；但是据 Cd/Zn 比值（已查明矿石中的 Cd 仅赋存于闪锌矿中，故  $a=b$  值， $a$  值可作为  $b$  值用），Cd 相对于 Zn 在矿体东段要更富集，故开采时将可在东段获得比西段含 Cd 更高的选矿产品（图 1）。又如，据单矿物分析可知，伴生元素

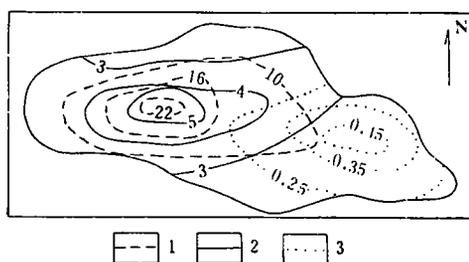


图 1 金星岭北部 Cd、Zn 品位及比值等值线图

1—Zn(%); 2—Cd(10<sup>-4</sup>); 3—Cd/Zn(10<sup>-4</sup>)

Cd 有随闪锌矿颜色变浅而含量升高的趋势，而据  $b$  值数据，则这种趋势反映得更为确切（表 1）。其次，利用  $b$  值变化可衡量伴生元素在主元素矿物中分布的均匀程度。如果统计表明，某种伴生元素的  $b$  值变化系

<sup>3</sup> [S] 称有效硫，即扣除方铅矿、闪锌矿含硫量之后的黄铁矿在矿石中的硫含量。

数小于或等于相应主元素在矿体中的品位变化系数（例如凡口铅锌矿床 Zn 的品位变化系数为 0.56，而只赋存于闪锌矿 1 种矿物中的 Cd 和 Ge，其 Cd/Zn 和 Ge/Cd 比值变化系数分别为 0.20 和 0.54），则可认为，用以控制主元素品位变化的勘探网度也足以控制伴生元素含量的变化，就工程控制程度来说，对伴生元素可求取与主元素相同级别的储量。此外， $b$  值还可直接应用于伴生元素的储量计算，其计算是将主元素金属储量乘以相应的  $b$  值即可。

表 1 不同颜色闪锌矿中 Cd 的含量

种类	单矿物分析结果(%)		$b(\text{Cd}/\text{Zn})$
	Zn	Cd	
黑褐色闪锌矿	52.86	0.0692	0.001310
红褐色闪锌矿	54.30	0.0812	0.001496
黄褐色闪锌矿	50.02	0.0801	0.001601

### 3. $k$ 值

$k$  值是比值分析中较重要的一个参数。只要伴生元素分布均匀，化学分析质量可靠，伴生元素与主元素含量之间有如下关系式：

$$k_1 + k_2 + \dots = 1$$

$$(k_1 = b_1 / a_1, k_2 = b_2 / a_2, \dots)$$

式中各符号分别为某一伴生元素与矿石中各载体矿物主元素的比值系数( $k$ )及其在矿石中( $a$ )和矿物中( $b$ )的比值。该式表明，伴生元素在矿石中各比值系数之和的理论值为 1，由于受伴生元素分布不均和分析误差的影响，通常接近 1。该关系式很有意义，因为它表明比值系数  $k$  值实际是矿石内伴生元素在各有关矿物中的分配系数。如果矿石所含伴生元素仅赋存于 1 种主元素矿物中，那么  $b$  值就等于  $a$  值，比值系数  $k=1$ 。若某一伴生元素赋存于两种或两种以上矿物中，则它与任一主矿物元素的比值系数必然小于 1，只有各比值系数之和才等于（或接近）1，据此可用来判断矿石中伴生元素的赋存关系是否已全部查明。例如凡口铅锌矿

床的 3 种金属矿物中，仅闪锌矿中含 Ga（平均 0.03%），方铅矿、黄铁矿含 Ga 均极微，似乎已可确定矿石中的 Ga 只赋存于闪锌矿之中。但进行比值分析结果是：

$$a_{\text{Ga}/\text{Zn}} = 0.0012, b_{\text{Ga}/\text{Zn}} = 0.00062, k_{\text{Ga}/\text{Zn}} = 0.5167, \text{表明闪锌矿只占有矿石中约 52\% 的 Ga, 还有半数的 Ga 可能赋存于别种未知矿物之中。进一步研究发现, 矿石中有少量泥质物含 Ga 很高, 据矿石和泥质物中 Ga 和 Al}_2\text{O}_3 \text{ 的含量, 得出 } a_{\text{Ga}/\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.0061, b_{\text{Ga}/\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.0028, k_{\text{Ga}/\text{Al}_2\text{O}_3} =$$

0.4590，可见，泥质物含有矿石中的 46% 的 Ga。由于  $k_{\text{Ga}/\text{Zn}} + k_{\text{Ga}/\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.5167$

$$+ 0.4590 = 0.9757 \approx 1, \text{从而可作出结论: 矿石中再无其他主要的含 Ga 矿物, Ga 在矿石中的赋存状态已全部查明。此外, 由于 } k \text{ 值是伴生元素在各赋存矿物中的分配系数, 相当于主元素矿物回收率为 100\% 时的伴生元素回收率, 因此可用来作为预测伴生元素选矿回收率上限的依据。因为任何主元素的选矿回收率都不能达到 100\%, 故伴生元素的选矿回收率应较比值系数 } k \text{ 值略低。从理论上说, 伴生元素回收率}(f) \text{ 仅能等于比值系数 } k \text{ 值乘以有关主元素的选矿回收率}(F) \text{, 即 } f = k \cdot F \text{, 但由于化学分析误差和样品代表性的影响, 实际上当主元素矿物的选矿回收率相当高时, } f \text{ 与 } k \text{ 数值差别并不显著。例如凡口铅锌矿床锌精矿的选矿回收率为 92\% 时, 伴生 Cd、Ga 的选矿回收率分别为 94.30\% 和 52.78\%, 而比值系数则分别为 } k_{\text{Cd}/\text{Zn}} \text{ 92.85\% 和 } k_{\text{Ga}/\text{Zn}} \text{ 52.48\%。}$$

矿石中再无其他主要的含 Ga 矿物，Ga 在矿石中的赋存状态已全部查明。此外，由于  $k$  值是伴生元素在各赋存矿物中的分配系数，相当于主元素矿物回收率为 100% 时的伴生元素回收率，因此可用来作为预测伴生元素选矿回收率上限的依据。因为任何主元素的选矿回收率都不能达到 100%，故伴生元素的选矿回收率应较比值系数  $k$  值略低。从理论上说，伴生元素回收率( $f$ )仅能等于比值系数  $k$  值乘以有关主元素的选矿回收率( $F$ )，即  $f = k \cdot F$ ，但由于化学分析误差和样品代表性的影响，实际上当主元素矿物的选矿回收率相当高时， $f$  与  $k$  数值差别并不显著。例如凡口铅锌矿床锌精矿的选矿回收率为 92% 时，伴生 Cd、Ga 的选矿回收率分别为 94.30% 和 52.78%，而比值系数则分别为  $k_{\text{Cd}/\text{Zn}}$  92.85% 和  $k_{\text{Ga}/\text{Zn}}$  52.48%。

应用实例

### 应用实例

近年在评价凡口铅锌矿床伴生汞时，再次应用了比值分析法。现把该评价内容及其效果作一简单介绍。

1. 用于研究伴生汞的空间分布规律

在单矿物检块样品的  $b$  值等值线图 (图 2) 中, 可反映出汞相对于锌富集在同生断层带上。这一现象为该矿床同生断层控矿提供了又一论据。<sup>(1)</sup>

2. 用于了解伴生汞分布的均匀程度

据矿石基本分析结果统计, Zn 的品位变化系数为 0.56, 而矿石检块采样  $a_{Hg/Zn}$  值变化系数为 0.33 (伴生汞主要赋存于闪锌矿中,  $a_{Hg/Zn}$  值应接近或等于  $b_{Hg/Zn}$  值), 即伴生汞的比值变化系数小于主元素的品位变化系数, 因此, 从工程控制角度看, 可认为用以控制主元素的勘探网度足可控制伴生汞的含量变化, 可求取与主元素相同级别的伴生汞储量。

3. 用于确定矿石中伴生汞的分配

据 3 个选矿流程样品的原矿和精矿化学分析资料 (表 2),  $k_{Hg/Zn}$  达 0.9139, 表明伴生汞 (占 91.39%) 主要赋存于闪锌矿中; 而  $k_{Hg/Zn} + k_{Hg/Pb} + k_{Hg/TFe} = 0.9139 + 0.0374 + 0.0567 = 1.0080 \approx 1$ , 可见除表 2 中所列的 3 种矿物外, 矿石中无其他重要含 Hg 矿物。上述结论与其他单位配分研究结果一致。<sup>(2)</sup>

4. 用于探索伴生汞在矿物中的赋存状态

据  $b_{Hg/Zn}$  值统计资料可知, 汞在闪锌矿中的分布不均匀, 按 163 件矿石样品建立的 Hg-Zn 回归方程取 3 倍标准差所确定的预测值范围, 有大量 (约 25%) 的单矿物

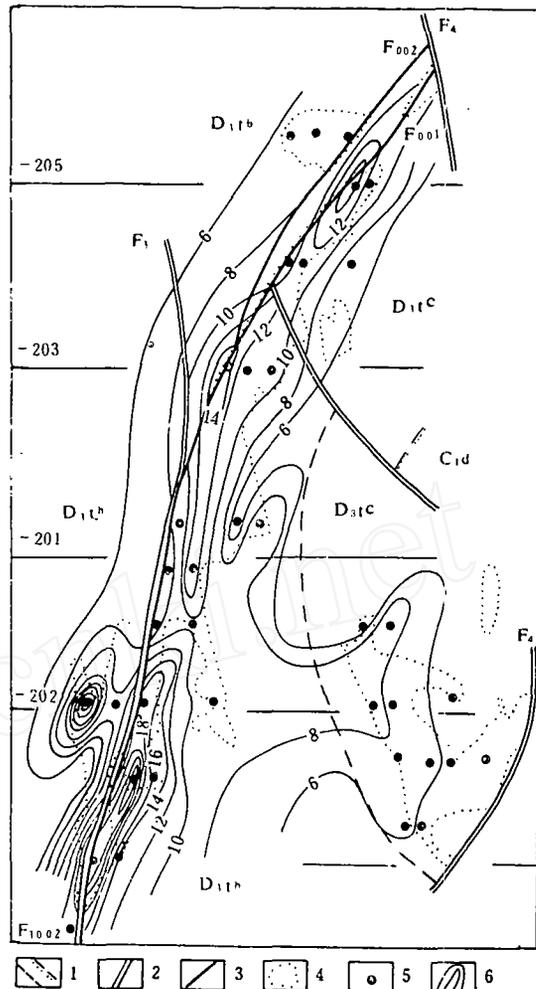


图 2 凡口铅锌矿床狮岭地段—200m 中段  $b_{Hg/Zn}$  值等值线图

(据黄慧玲, 1990)

1—地质界线; 2—晚期断层; 3—同生断层; 4—主要矿体界线; 5—采样点; 6— $b_{Hg/Zn}$  比值等值线 ( $\times 10^{-4}$ )

表 2 伴生汞比值系数计算表

主元素 (矿物)	主元素品位(%)		伴生汞含量 ( $\times 10^{-6}$ )	比值 ( $\times 10^{-4}$ )		比值系数	
	原矿	精矿		$a_{Hg/Zn}$	$b_{Hg/Zn}$	$k_{Hg/Zn}$	
Zn (闪锌矿)	原矿	11.31	115.57	10.22		$k_{Hg/Zn}$	0.9139
	精矿	51.81	484.03	9.34			
Pb (方铅矿)	原矿	5.08	115.57	22.75		$k_{Hg/Pb}$	0.0374
	精矿	51.27	43.34	0.85			
TFe (黄铁矿)	原矿	18.09	126.59	6.70		$k_{Hg/TFe}$	0.0567
	精矿	38.26	14.43	0.38			

样品落在预测区间之外, 并且大多集中在预测区间的上方, 少数样品甚至高出预测区间

上限 1~4 倍。此现象表明, 汞在闪锌矿中除呈分布较均匀的类型同像或混入物外, 可

能还有呈微粒汞矿物状态存在,形成局部汞含量的增高。这种推测与闪锌矿及其浸溶残渣所做的扫描电镜资料相吻合<sup>[2]</sup>。

#### 5.用于对比检验化学分析质量

有些单位对凡口铅锌矿床伴生汞曾作过研究,积累了大量的 Hg、Zn 化学分析资料;主要有 3 个单位,其中有 2 个单位未做内、外部检查分析,分析质量不清,因而对这些分析资料不知可否混合使用。笔者对上述资料作为 3 个样本进行了比值分析,对求得的  $b_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  值(未分别对 Hg 和 Zn)计算了方差并进行 F 检验,结果证明在  $\alpha=0.05$  水平上,3 个样本的  $b_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  平均值无显著差异,故可确认分析质量可靠,均可利用。

#### 6.用于预测伴生汞选矿回收率

矿床按平均  $a_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  和平均  $b_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  值求得的比值系数  $k_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  为 0.9204,依此估计其选矿回收率最高可达 92%。据 3 个选矿流程样品计算的  $k_{\text{Hg}/\text{Zn}}$  值分别为 84.52%、94.34%、97.03%,平均 91.39%;选矿流程样品按精矿产出率及汞品位计算得出的伴生汞回收率则分别为 90.97%、91.73%、89.09%,平均 90.54%,与比值系数平均值接近。

#### 7.用于储量计算结果的验算

凡口矿床伴生汞储量计算是采用相关法,即按不同地段依据矿石分析结果建立 Hg—Zn 回归方程,计算出各块段的汞储量,最后统计出矿床中的总储量。经用比值法进行验算对比,两者储量数字接近,相对

误差仅为-1.8%~+10.9%。

## 结 语

比值分析是对伴生元素进行评价研究的一种有效的方法。其基本点是把矿石中和矿物中的伴生元素含量与主元素含量相对应进行研究,以消除主元素品位变化和单矿物(或精矿)分离不纯的影响,更确切地反映伴生元素自身变化和富集规律,了解它在载体矿物中分布的均匀度和分配情况,判断矿石中有关载体矿物是否已全部查明等;并可应用其论证控制伴生元素的合理勘探网度和预测伴生元素的选矿回收率。只要作为比值分析研究基础的化学分析资料齐全、准确,样品的种类、数量、质量和代表性足够,则结论是可靠的。

比值分析法适宜应用在矿石中主元素组成矿物简单,尤其是 1 种主元素品位仅代表 1 种矿物含量的矿床。如果矿床中同种主元素形成几种矿物,而又都含有不等数量的同一伴生元素,则需要首先找出可确定矿物含量的相应步骤或方法再进行比值分析,此时方法应用过程较复杂,本文未有涉及。总之,比值分析法与其他研究矿石物质成分分配的方法比较,不失为一种行之有效的方法。

#### 参考文献

[1]赖应钱,地质论评,1988,第3期。

[2]黄慧玲,广东地质,1990,第1期。

## Ratio Analysis and Its Application in Associated Element Evaluation

Lai Yingqian Huang Huiling

Ratio analysis is a method by which the occurrence principle of associated element is studied in accordance with ratio ( $a = x_0 / c_0$ ) of associated element content ( $x$ ) and major element content ( $c$ ) in ore, the ratio ( $b = x_1 / c_1$ ) in mineral and both ratio (ratio coefficient  $k = b / a$ ). Only one kind of mineral contains a value of same associated elements in  $b$  value and ore. The principle of associated element change and enrichment and the well-distributed degree of associated element in carrier mineral can be better understood. The  $k$  value connected with each mineral in ore has the following relation:  $k_1 + k_2 + \dots = 1$ . In view of the above, we can determine the distribution of associated element in every related mineral and judge whether the minerals occurring as the associated element are all found out.