

## 隐伏矿深度与规模预测铅同位素方法新进展\*

## New advances in the forecast of depths and reserves of concealed deposits by using lead isotope method

朱炳泉<sup>1</sup>, 崔学军<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院同位素地质年代学与地球化学重点实验室, 广东 广州 510640; 2 甘肃省地矿局, 甘肃 兰州 730000)

ZHU BingQuan and CUI XueJing

(1 Key Laboratory of Isotopic Geochronology and Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2 Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**摘要** 隐伏矿深度与规模预测铅同位素方法是依据于成矿过程中壳-幔相互作用和元素分选性规律及其产生的铅同位素组成随深度变化的函数关系, 根据浅部三维定位的铅同位素矢量值确定隐伏矿的最大隐伏深度和隐伏系数(总隐伏矿量/已探明矿量)。本研究以甘肃寒山-鹰咀山金矿实例, 发展和改进了确定隐伏矿三维形态定位的新方法。通过一系列的同位素化探剖面确定矿体不同部位的最大隐伏深度和隐伏系数, 进一步确定隐伏矿形态的预测总资源量(>130 t 金属量), 指出进一步勘探的潜力区。最后还对本方法的一些关键技术和要注意的问题进行了讨论。

**关键词** 隐伏矿深度与规模预测; 铅同位素方法; 寒山-鹰咀山金矿

隐伏矿深度与规模预测对于在勘查区的攻深找盲, 现开发矿山的可持续发展评估以及危机矿山的深部潜力评价均具有重要意义。隐伏矿深度与规模预测铅同位素方法主要依据于成矿过程导致的 U、Pb 分异和铅同位素组成在矿体中的变化规律。成矿带的铅同位素组成包括成矿时壳幔相互作用产生的壳幔不均一混合铅(初始铅)和成矿以后积累的放射成因铅。前者服从二元混合模式; 后者服从放射性衰变规律。从这一基本前提出发, 可以导出铅同位素矢量  $V$  (朱炳泉, 1993; Zhu, 1995) 与海拔高度  $H$  之间的函数关系:  $V=A F_1(k_1H)+B(t) F_2(k_2H)$ , 函数  $F(x)$  可以是指数或线性形式。因此铅同位素在三维空间的变化已成为确定矿体形态的一把尺子。对于一个同成因、同成矿时代的矿床,  $A$ 、 $B(t)$ 、 $k_1$  和  $k_2$  均为常数。通过将矿床中测定的铅同位素组成  $V_1$ 、 $V_2$  值(或其对数值)对其相应样品海拔高度  $EH$  作图, 可以看到具有斜率分别为  $k_1$  和  $k_2$  的两阶段线性关系; 对于具有不同成矿年龄的样品  $k_2$  斜率线则发生平行位移。根据铅同位素  $V_1$  或  $V_2$  值随海拔高度  $EH$  的函数关系, 以及区域地壳、地幔平均铅同位素组成值(也是主矿体和最深矿体的出现值), 可以预测隐伏矿可能出现的深度范围。这一预测方法在云南龙脖子铜矿、东川铜矿、海南抱板和河北东平金矿预测中得到成功应用(常向阳等, 1997; Chang et al., 2000; 包志伟等, 2000)。为了对有一定勘探程度(指对矿体有一定程度的槽探与钻孔揭示)的矿床的隐伏矿量作估计, 我们提出了隐

\*本文得到甘肃省科技厅、甘肃省地矿局与中国科学院知识创新工程资助  
第一作者简介 朱炳泉, 男, 1940 年生, 研究员, 同位素地球化学专业。

伏系数的概念。矿床中 Pb 同位素的变化都是通过矿石载体来体现的。根据成矿壳幔相互作用过程中质量平衡关系,可以得到矿体总储量  $Q$  与已探明的浅源矿储量  $Q_1$  之间的比例关系  $R$  (称为隐伏系数) 的最保守估计:  $R=Q/Q_1=[(V_{\max}-V_m)(V_{\min}-V_c)]/[(V_{\max}-V_{\min})(V_c-V_m)]$  (崔学军等, 2005)。式中  $V_{\max}$  和  $V_{\min}$  为已勘查或采矿深度水平上的铅同位素矢量的最大值与最小值;  $V_c$  和  $V_m$  为区域地壳与地幔的相应平均值。应用这一方法曾预测龙脖子铜矿东带隐伏储量为 >60 万吨, 后来的勘探证实达到 100 万吨。近来在甘肃寒山—鹰咀山金矿我们进行了隐伏深度和储量的综合预测, 并进一步发展确定隐伏矿的形态的新方法。

位于祁连山与阿尔金断裂交汇带的鹰咀山(西)和寒山(东)金矿呈东西向展布。两个金矿延伸均达 5 km 左右, 之间相距 7 km。同位素年龄测定表明两个矿成矿时代是一致的 (~410 Ma)。

本区地幔本区的地壳与地幔的可分别制约在 17.8~18.2、15.55~15.65 和 37.7~37.9 以及 17.65~17.8、15.46~15.54 和 37.2~37.7 左右, 相应的地壳  $V_1$  与  $V_2$  值变化在 19.48~31.89 (平均  $V_1$ : 25.69) 与 29.13~43.74 (平均  $V_2$ =36.44), 地幔值变化在 2.4~19.48 (平均  $V_1$ =10.94) 与 22.9~28.9 (平均  $V_2$ =25.9)。因此明显区别于华北、塔里木与华南省(朱炳泉, 2001)。与扬子省的东部地区相比, 祁连块体具有明显的贫钍-铅特征 ( $V_2>V_1$ ), 可与古亚洲域相比较, 而不同于古特提斯域。

鹰咀山矿地表铅同位素化探剖面  $V_1$  与  $V_2$  值在矿体及其蚀变带均出现明显的负异常, 并接近区域地壳平均值, 因此该矿床的中段矿体已暴露到主矿体部位。从该矿床自东至西矿体的  $V_2$  值从 43.57 降至 35.67, 标志着矿体的揭示深度从东到西存在着由浅至深的变化规律。116 线以东进入隐伏区, 90~116 线达到矿体出露的中上部, 而 80 线以西出露的矿脉已代表了矿体的下部, 并趋向于尾部。

各勘探线从地表至不同深度的矿体钻孔岩心, 铅同位素组成  $V_2$  与  $V_1$  值明显呈现出线性下降。100 线地表 (2 773 m)、ZK1001 (2 673 m) 至 ZK1005 (2 585 m), 矿体平均  $V_2$  值从 37.46 线性下降至 36.94。海拔高度 ( $EH$ ) 与  $V_2$  之间呈现好的线性相关, 与  $V_2$  对数值的线性关系则更好。

$$V_2=0.00277 EH+29.76 \text{ (相关系数 } R=0.996) \text{ ----- (1)}$$

$$\text{或 } \ln(V_2)=0.0000746 EH+3.416 \text{ (相关系数 } R=0.997) \text{ ----- (2)}$$

100 线两侧的 95、104 和 110 线,  $EH$  与  $V_2$  之间构成了 2 个斜率略大的线性关系。这 3 组线性关系均交于一点, 相当于所取样品最深点的位置 ( $EH=2 585 \text{ m}$ ,  $V_2=36.94$ )。正好观察到了理论模型中 2 个线性段的的转折点 (在  $EH=2 585 \text{ m}$ ,  $V_2=36.94$  附近)。

根据各勘探线的  $V_2$  值下降率的线性关系可进一步计算出矿体各部位的隐伏深度  $EH_i$  下限值 (变化在 1 636 至 2 558 m) 和隐伏系数  $R_i$  (变化在 1.6~7.9 之间)。矿体的总平均隐伏系数为  $R_s=\sum R_i \cdot EH_i / \sum EH_i$ 。矿体的总隐伏储量以及对厚度与品位估计, 也可给出。计算得的总平均隐伏系数  $R_s$  为 3.68。根据本研究所采样品的深度水平, 该金矿的勘探 C+D 级储量为 11.55 t。因此矿体的预测储量为:  $3.68 \times 11.55 \text{ t}=42.5 \text{ t}$ 。矿体的厚度  $\times$  品位为  $9.9 \text{ m} \times \text{g/t}$ 。整个矿体垂向延伸从西向东由浅至深, 而成为隐伏矿体。

寒山金矿自西北向东南, 各个地表铅同位素化探剖面  $V_1$  与  $V_2$  值在矿体及其蚀变带出现了由明显的负异常向明显正异常的过渡变化, 但负异常和程度 ( $V_2>43$ ,  $V_1>32$ ) 又明显低于鹰咀山金矿。因此寒山矿床的暴露程度自西北向东南由中深至浅部发展。F<sub>16</sub> 断裂以南的矿脉出现明显的强正异常 (平均  $V_2=194$ ,  $V_1=275.8$ ), 标志着浅源矿的出现。F<sub>16</sub> 断裂以北 116 线上的 8 号脉取得了地表、平洞和钻孔的铅同位素变

化资料, 深度变化从 2 855 m 至 2 485 m。这些不同高程样品的铅同位素  $V_2$  值明显表现出两阶段的线性变化。从 2 714 m 至 2 485 m, 其  $V_2$  与海拔高程 ( $EH$ ) 之间存在很好的线性相关:

$$V_2=0.0254EH-10.62 \text{ (相关系数 } R=0.995) \text{ ----- (3)}$$

$F_{16}$  断裂以南 24 线两条相邻的脉 (11 与 26 号) 及钻孔在 2 742 m 至 2 607 m 高程范围内铅同位素  $V_2$  与海拔高程  $EH$  也存在好的线性关系。

$$V_2=0.4298EH-1068.3 \text{ (相关系数 } R=0.9995) \text{ ----- (4)}$$

关系式 (4) 主要反映了放射成因铅随深度的变化规律, 而关系式 (3) 主要反映了壳幔混合初始铅随深度的变化规律。两者之间的转折出现在 2600~2700 m 之间。根据这些关系可以确定各条矿脉的隐伏深度 (在海拔 1 780 m 至 2 370 m 之间)。计算得全矿区平均隐伏系数为 6.10。该矿现取样部位的勘探资料表明 C+D 级储量为 14.6 t。因此预测储量为 89.1 t。隐伏深度最大区域分布于矿区的东南部和中部, 而隐伏系数最大的区域在矿区的东南部。整个矿化区域向西部和东北部, 隐伏系数与隐伏深度均趋于减小。因此矿区深部潜力最大的区域应是东南部, 其次中部。鹰咀山至寒山北区 ( $F_{16}$  断层以北)  $V_2$  值呈现出缓慢增加。而从寒山北区与南区 ( $F_{16}$  断层以南)  $V_2$  值急剧增加。根据  $V_2$  值变化率, 寒山北区比南区至少相对抬升了 200 m 以上。鹰咀山矿与寒山北区虽相距 7 km, 但鹰咀山矿比寒山北区只相对抬升了 100 m 左右。它们位于同一构造断块上, 但西部相对东部抬得更高。它们之间应可以找至  $V_2$  变化在 40 至 60 的矿体。

在应用铅同位素进行隐伏矿深度与规模预测时在方法学上必须注意以下几个关键点:

(1) 对矿区周边大范围内 (半径 100 km 左右) 的同时代和相近时代幔源与壳源岩石进行广泛 GPS 定位取样和测定铅同位素组成 (并要有前人或自己年龄测定的数据), 确定小区域的地壳与地幔平均铅同位素组成。如矿区位于地球化学边界 (朱炳泉, 2001), 则应认真确定矿床所处的地球化学省, 以及相邻地球化学省幔源对矿区的影响程度。

(2) 在矿区内严格按勘探线方向的剖面上进行三维空间定位取样 (包括不同高度的地表、探槽、平洞和钻孔样, 定位精确到米), 充分利用自然高差和勘探高差。根据矿化规模大小、预测要求和预测成本确定取样剖面的数目 (40~200 m 左右一条)、长度 (不小于蚀变带宽度的十倍) 与密度 (兼顾岩性与距离的变化, 岩性变化必须取样, 同一岩性 50 m 左右取一个样, 矿体与蚀变带 2~5 m 一个样)。样品力求新鲜。

(3) 确保铅同位素比值的测量精度 ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  精度小于 0.05%)。不同仪器、不同实验室测定的铅同位素组成必须要用统一的 NBS981 标样值进行校正 (不校正带来的偏差和影响远大于测定误差)。这也是一些实验室未引起重视的问题。

(4) 在铅锌矿等高铅含量矿床和矿化区, 必须要充分注意和避免在采样前环境下的地表风化搬运、采矿、堆矿、选冶带来的围岩污染问题, 以及采样后在包装、运输、样品处理过程中产生的交错污染问题。千分之一的污染将会完全改变围岩的铅同位素组成。

(5) 成矿截止铅同位素矢量值的确定应充分对比同一地区同一类型已知矿床, 所预测矿床以及区域地壳与地幔的铅同位素组成变化情况。这是一个经验性与理论性并重的问题, 也是一个需要不断总结、研究、改进的问题。

#### 参 考 文 献

- 包志伟, 赵振华, 张佩华, 等. 2000. 东坪式金矿铅同位素组成特征及其化探评价[J]. 地球化学, 29(3): 223~230.
- 常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 等. 1997. 东川铜矿同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用. 地球化学, 26(2): 32~38.
- 崔学军, 朱炳泉. 2005. 铅同位素找矿方法研究现状与进展综述. 甘肃地质学报, 14(2): 11~17.
- 朱炳泉. 1993. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化学省与矿种区划. 地球化学, (3): 210~216.
- 朱炳泉. 2001. 地球化学省与地球化学急变带. 北京: 科学出版社.
- Chang X Y and Zhu B Q. 2000. Lead isotopic exploration intersecting mineralization zones for the depth forecast of concealed deposits: A case from Longbohe Cu deposit, Jinping, Yunnan Province, China [J]. Science in China(D), 43(3): 293~301.
- Zhu B Q. 1995. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes. J. Geochemical Exploration, 55: 171~181.

www.cnki.net