

蚀变带元素地球化学成矿预测法 ——以金龙山微细浸染型金矿为例^{①②}

赵利青

(北京大学地质学系,北京,100871)

提 要 金矿化作用伴随围岩蚀变,且多受断裂控制,反映在地球化学上出现某些元素的异常。在已发现一定矿(化)体并掌握一般控矿特征的地区,利用已有工程在蚀变带内连续捡块采样,分析有关指示元素,总结有关的地球化学指标,建立地球化学预测模式,对已知矿(化)体及外围异常进行地球化学评价。该方法在秦岭南坡金龙山微细浸染型金矿上的应用有较好的效果。

关键词 元素地球化学 成矿预测 蚀变带 金矿 金龙山

1 预测模型的研究思路

元素在控矿断裂带内三维空间分布规律的研究,可以更加直观地进行深部矿体的定位预测^①。根据已知矿体的地球化学特征,快速经济地评价异常或矿化蚀变带之找矿前景的方法,具有重要的找矿意义。本文根据成矿成晕理论,利用已有工程经科学的组合采样,用较低的成本捕捉更多的成矿地球化学信息,进而预测矿体的延深(或延伸),评价异常。我们称之为蚀变带元素地球化学预测法(图1)。之所以强调蚀变带是因为作为地球化学工作者在野外结合地质特征、工程控制情况能够识别矿化蚀变可能存在的部位,有的放矢观察采样。本方法适用于已发现矿(化)体,并掌握一般控矿规律的地区。本方法要求弄清微量元素组合,而不必进行各元素的原生晕研究,后者要求系统采样,成本较大。

2 金龙山金矿地质特征

金龙山金矿位于南秦岭印支褶皱带,秦岭断陷海槽镇旬盆地金鸡岭复式向斜北翼松(树岭)—枣(树滩)背斜南翼,是在原丁(家山)—马(家沟)汞锑矿带的西延方向发现的微细浸染型

① 收稿日期:1996-11-12,改回日期:1997-07-24

② 武警黄金指挥部资助项目,编号 HJ9313

金矿带。区内出露上古生界及下中生界，褶皱、断裂构造广泛发育，无岩浆岩出露。主要赋矿岩系为上泥盆统南羊山组、下石炭统袁家沟组，区域上岩相变化大，控制着 Pb-Zn、Sb-Au、Hg-Sb 矿化的水平分带⁽²⁾，中部的锑金成矿区段为一套重力流沉积为主的细碎屑岩与颗粒碳酸盐高频叠复的浊积岩相组合⁽²⁾。

金矿体受短轴背斜、断裂、节理、裂隙及可渗透性层位(有利岩性)控制，有利岩性为粉砂岩、粉砂质页岩、钙质页岩、薄层灰岩夹页岩等。在长 18km、宽 2km 的范围内已发现二十余个矿(化)体，从西向东分别为古楼山、丘岭、腰俭、金龙山四个矿床(图 2)。

矿体一般为透镜状、脉状、似层状、扁豆状、不规则状；围岩蚀变较弱，主要有硅化、方解石化、伊利石化，金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、辉锑矿、辰砂、闪锌矿。金呈微球粒赋存于含砷黄铁矿、毒砂颗粒边缘或粒间⁽³⁾。

根据作者的最新研究^① 金成矿时代为印支期(232Ma)，金矿化与印支期碰撞造山、构造岩浆活动有关，金、砷、锑、汞来自深部，与镇安—板岩深大断裂的活动有关，Au、As 矿化与 Sb、Hg 矿化既有联系又有分离，从早到晚可分为早期石英-方解石，含铁方解石-石英-黄铁矿-毒砂、方解石-黄铁矿、石英-方解石-辰砂-辉锑矿、晚期石英-方解石五个阶段。粉砂岩中多形成浸染型矿化、灰岩中多形成明显受断裂控制的脉型矿化，归根到底是构造和岩性控矿而不是地层

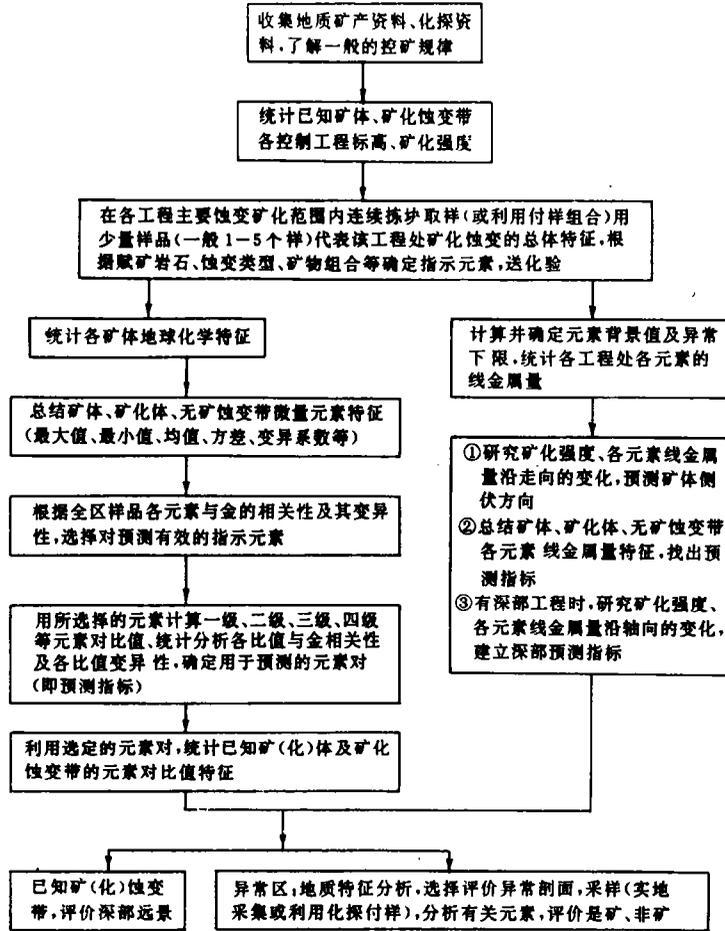
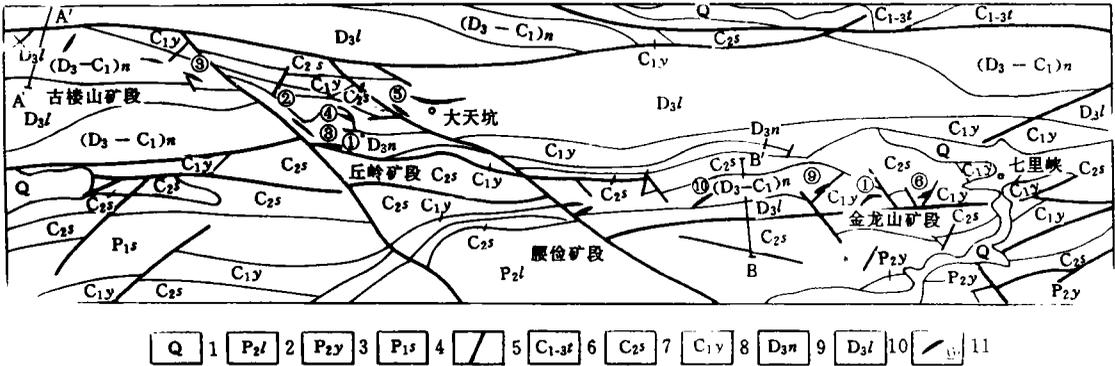


图 1 蚀变带地球化学预测流程图

Fig. 1 Flow diagram of geochemical prognosis in alteration zone

① 赵利青. 东南秦岭金龙山矿带地质地球化学特征及成矿作用研究(北京大学博士学位论文), 1997.

时代控矿。



1. 第四系 2. 上二叠统龙洞川组 3. 上二叠统熨斗滩组 4. 下二叠统水峡口组 5. 断裂 6. 石炭系铁厂铺组
7. 石炭系四峡口组 8. 下石炭统袁家沟组 9. 上泥盆统南羊山组 10. 上泥盆统冷水河组 11. 矿脉及编号

图2 金龙山金矿带地质图

Fig. 2 Geological map of Jinlongshan gold deposits

3 预测模型

主要在各矿段蚀变带范围内连续捡块采样,分析了有关指示元素,从地球化学指标或元素比值、元素异常特征或线金属量、逐步回归估值等方面进行了研究。

3.1 矿体、矿化体、蚀变围岩的地球化学特征

由于微细浸染型金矿体与围岩多无明显的界限,所以这里把金含量大于 1×10^{-6} 的样品划分矿体,把 $1 \sim 0.1 \times 10^{-6}$ 的样品划为矿化体,把小于 0.1×10^{-6} 的样品划归蚀变围岩。

从矿体、矿化体到蚀变围岩,随着金含量的降低,As、Sb、Hg有规律地降低,而Zn、Ni、V、Mn则升高。334件样品的相关分析表明,Au与Ag、As、Sb、Hg正相关,而Zn、Ni、V、Mn负相关,前一组元素是金矿化指示元素,Au、As一起富集于含砷黄铁矿毒砂中,二者正相关性明显(图3),Sb矿化叠加于金矿化之上或与金矿化在空间上分离;后一组元素则是沉积围岩中富集的元素,而非热液带入的元素。

各种性质样品微量元素变异系数由大到小排列如下:

矿体: Sb、Hg、Ba、Au、Li、Sr、As、Ag、V、Co、Zn、Ni、Cu、Mn

矿化体: Sb、Hg、As、Zn、Li、Sr、Ba、Mn、Cu、Ni、V、Au、Co、Ag

蚀变围岩: Sb、Hg、Mn、As、Sr、Ba、Li、Co、Zn、Ag、V、Ni、Cu、Au

所有样品: Sb、Mn、Au、Hg、As、Li、Ba、Sr、Zn、V、Ag、Ni、Co、Cu

也就是说矿体上Co、Zn、Ni、Cu、Mn变化较小;矿化体,蚀变围岩中各元素的变异系数一般均较大,蚀变围岩中Mn的变异系数更大;所有样品的结果Sb、Mn、Hg、As的变异性较大,V、Ag、Ni、Co、Cu变异性较小。

综合以上相关性,变异性结果,选择 As、Sb、Hg、Zn、Ni、V、Mn 作为对预测较为有效的元素。

3.2 矿体、矿化体、蚀变围岩的元素比值特征

利用所选出的上述元素,分别计算了 50 个元素比值(指标),通过考察这些比值与金的相关性及其变异性,最后选择了较好的 11 个指标作为预测指标(表 1)。

这些元素对比值元素累乘积的比值是根据与金的相关性为强化样品之间的差异性而选择的,统计了各种性质样品的地球化学指标特征:①各指标由矿体、矿化体到蚀变围岩均有降低的趋势;②各指标的变化范围很大,并有交叉或重叠,这正符合复杂的地质特征。D、E、F、K 在各种性质样品中均与 Au 显著正相关。指标 C、D、K 与 Au 的正相关性最好,但它们的变异性较小。

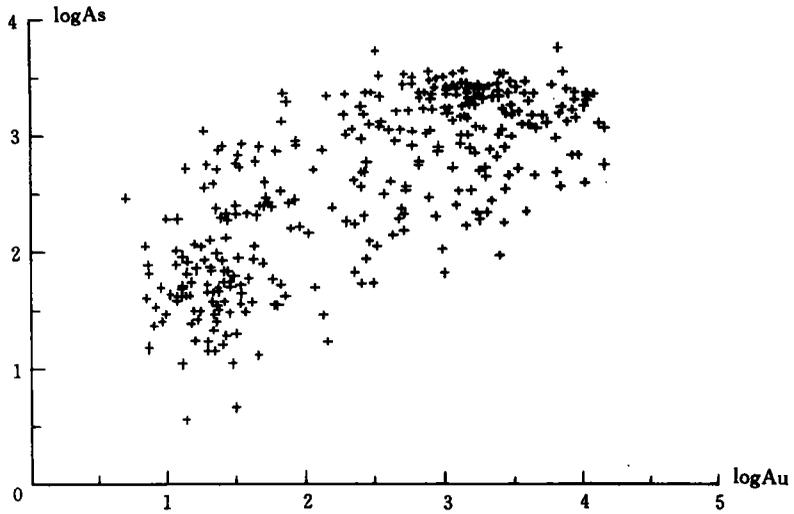


图 3 各种样品 Au-As 含量变异图(Au:10⁻⁹,As:10⁻⁶)

Fig. 3 Correlation of Au and As of various samples

表 1 地球化学判别指标值

Table 1 Index value of geochemical discrimination

| 代号 | 预测指标 | 矿体 | 矿化样 | 蚀变围岩 | 总错判率(%) |
|----|--|-------|-----------|-------|---------|
| B | 1000Sb/Ni | >2829 | 2829—871 | <871 | 44.66 |
| C | 1000As/Mn | >3781 | 3781—1264 | <1264 | 32.34 |
| D | 1000As · Sb/(Mn · Zn) | >4362 | 4362—494 | <494 | 38.62 |
| E | 100As · Sb/(Mn · Ni) | >1063 | 1063—115 | <115 | 39.22 |
| F | 10As · Sb/(Zn · Ni) | >597 | 597—68.4 | <68.4 | 37.43 |
| G | 1000As · Sb · Hg/(Mn · Zn · V) | >369 | 369—16 | <16 | 46.71 |
| H | 1000As · Sb · Hg/(Mn · V · Ni) | >905 | 905—44 | <44 | 48.50 |
| I | 1000As · Sb · Hg · Ba/(Mn · Zn · V · Ni) | >2540 | 2540—91.5 | <91.5 | 45.51 |
| J | 100As · Sb · Hg/(Zn · Ni · V) | >478 | 478—20 | <20 | 47.01 |
| K | 10As/Ba | >655 | 655—247 | <247 | 41.62 |
| L | 10As · Sb/Mn | >2635 | 2635—352 | <352 | 37.72 |

如果用矿石样、矿化样品各指标的加权平均值作为矿石样与矿化样的分界线,用矿化样品、蚀变围岩各指标的加权平均值作为矿化样与蚀变围岩的分界线,则得到表 1 中的判别指

标,表中的指标值仅有相对意义,利用它们进行回代判别,其总错判率也列于表1中。其中1000As/Mn的错判率最低。进一步分析发现:①各指标对蚀变围岩的判错率最小,变化于2.21%~16.18%之间;对矿化样的错判率变化于42.5%~80%之间;对矿体的错判率变化于38.98%~80.51%之间,说明各指标可以较为有效地区分蚀变围岩和矿(化)体,即对是否为找矿目标做出判断,但矿体及矿化样品的微量元素含量变化较大,不易区分。②各指标中对矿体判别最有效的指标是1000As/Mn(C),对矿化样品判别最有效的是10As·Sb/(Zn·Ni)(F),对蚀变围岩最有效的是1000As·Sb·Hg/(Mn·V·Ni)(H),实际应用中可结合起来。③表1中划定的界限,在实际应用中要有灵活性,不能机械地套用。

3.3 金含量的定量预测模型

分别利用所有334个样品的微量元素数据和微量元素比值数据进行逐步回归分析,入选变量及剔除变量的临界值均取2.5,得到如下两个回归方程(Au的单位为 10^{-6} ,其它元素为 10^{-6}):

$$\text{Au} = 180.4 + 2365\text{Ag} + 0.806\text{As} + 2.121\text{Sb} + 278.9\text{Hg} - 8.261\text{Zn} - 4.239\text{V} + 12.4\text{Li} \quad (1)$$

$$\text{Au} = 62.42 + 117.1\text{Sb}/\text{Ni} - 382\text{As} \cdot \text{Sb}/(\text{Mn} \cdot \text{Zn}) + 20.09\text{As} \cdot \text{Sb}/(\text{Zn} \cdot \text{Ni}) - 177.2\text{As} \cdot \text{Sb} \cdot \text{Hg}/(\text{Mn} \cdot \text{V} \cdot \text{Ni}) + 203.0\text{As} \cdot \text{Sb} \cdot \text{Hg}/(\text{Zn} \cdot \text{Ni} \cdot \text{V}) \quad (2)$$

式(1)、(2)的复相关系数分别为0.58、0.60,剩余标准差分别为2063.23、2034.44,F统计量分别为23.79、29.93。回归估值与观测数据的初步分析发现:①对矿体样基本无判错,换句话说矿体上的回归估值一般大于 1×10^{-6} ;②某些矿化样品的回归估值大于 1×10^{-6} ,尤其是矿体旁侧的矿化样;③某些蚀变围岩样的回归估值明显大于 1×10^{-6} ,是重要的找矿信息。

利用对预测有较好作用的As、Sb、Hg、Zn、Ni、V、Mn与Au进行逐步回归分析,得到如下方程:

$$\text{Au} = 910.5 + 0.763\text{As} + 2.236\text{Sb} + 305.3\text{Hg} - 4.787\text{Zn} - 4.518\text{V} \quad (3)$$

利用As、Sb、Hg、Zn、Ni、Mn与Au进行逐步回归分析,得到如下方程:

$$\text{Au} = 692.6 + 0.761\text{As} + 2.598\text{Sb} + 299.5\text{Hg} - 6.898\text{Zn} \quad (4)$$

式(3)、(4)的复相关系数分别为0.54、0.53,剩余标准差分别为2124.55、2133.75,F统计量分别为27.31、32.88。

式(1)、(2)、(3)、(4)对已知矿体样的错判率分别为8.47%、10.17%、5.93%、8.47%,即对矿体的判别最有效。其中式(4)涉及的元素仅有As、Sb、Hg、Zn,具有较大的实用性。

3.4 微量元素线金属量特征

在综合研究的基础上确定了矿区地球化学背景及异常下限(数据略),计算了各工程内的微量元素线金属量,它可以反映所在地段矿化、微量元素量的总体特征,初步总结出如下几点:

(1)矿体上Au、As、Sb、Hg异常明显,尤其是As异常与金矿化有很好的对应关系,Sb、Hg异常则时有时无,此外Ag、Zn、Ni、V、Li、Mn、Sr、Ba均可有异常,但与矿体对应关系不好。

(2)丘岭矿段及腰俭矿段As、Sr、Ba、Mn的异常比金龙山矿段明显(异常强度高);金龙山矿段Hg异常的发育较普遍,Sb、Hg异常强度高于丘陵(腰俭)矿段,且一般不发育Mn异常。

(3)矿(化)体地段与蚀变围岩(或无矿化地段)有较大的区别,前者Au、As、Sb、Hg异常明

显,后者 Zn、V、Mn、Ni 等异常较明显。一般矿(化)体所在地段 As 的线金属量大于 $1000(10^{-6} \cdot \text{m})$, Sb $> 100(10^{-6} \cdot \text{m})$; 无矿地段 V 的线金属量大于 $200(10^{-6} \cdot \text{m})$, Mn $> 6000(10^{-6} \cdot \text{m})$ 。可作为评价参考指标。

4 成矿预测

4.1 已知矿(化)体远景评价

主要从元素地球化学指标、定量预测模型(式(1)、(2)、(3)、(4))、元素线金属量(即哪些元素出现异常)三方面综合考察,对已知矿体深部远景作出评价。

以丘岭 4 号矿体东段为例,地表控制探槽从西到东为 TC0-2、TC3-2、CT7-2、TC11-2、TC19-2。其中 TC7-2 处前人未圈出矿体,本次研究发现品位 1.62×10^{-6} 、宽 1.5 米的矿体, Au、As、Ba 的线金属量均较低,同时无 Zn、V、Mn 异常, Sb 异常明显,预测深部应该有较大延伸。TC7-2 中样品金含量变化于 $86 \times 10^{-9} \sim 1290 \times 10^{-9}$, 式(1)、(2)、(3)、(4)的回归估值分别变化于 $521 \times 10^{-9} \sim 1333 \times 10^{-9}$ 、 $811 \times 10^{-9} \sim 1430 \times 10^{-9}$ 、 $969 \times 10^{-9} \sim 1234 \times 10^{-9}$ 、 $799 \times 10^{-9} \sim 1114 \times 10^{-9}$, 从一个侧面说明金矿(化)体的存在。坑道 PD0 中两个矿化样品的预报值也均为矿体,说明矿化较好,深部应有延深。

4.2 外围异常评价

外围异常评价研究通过剖面穿越,野外观察采样,采集化探付样等多种方法来进行。穿越剖面时配合矿化蚀变观察采样进行评价;付样的选择则是尚未进行工程控制的某些异常含量较高的样品,分析了 Au、As、Sb、Hg、Zn、Ni、Mn 七个元素,进行评价。

选择了 13 个异常采集了土壤付样(一般选用 Au 观测值高的样品),分析了 Au、As、Sb、Hg、Zn、Ni、Mn 7 个元素,计算了 B、C、D、E、F、L 六个指标(代号说明见表 1)。

丘陵 24 号、15 号、11 号异常分别采付样 2、1、3 个,原观察值多大于 100×10^{-9} , 新的 Au 观察值变化于 $101 \times 10^{-9} \sim 940 \times 10^{-9}$; 地球化学指标多判别为蚀变围岩,式(4)的回归估值变化于 $396 \times 10^{-9} \sim 745 \times 10^{-9}$, 综合分析认为它们是矿致异常,有望找到矿体。腰俭 18 号、11 号、23 号异常各采 1 个付样,原观察值分别为 10×10^{-9} 、 100×10^{-9} 、 50×10^{-9} , 新的观察值分别为 14×10^{-9} 、 44×10^{-9} 、 140×10^{-9} , 地球化学指标判别为蚀变围岩,式(4)的回归估值分别为 126×10^{-9} 、 3.5×10^{-9} 、 211×10^{-9} , 综合分析认为无找矿意义。腰俭 5 号异常 320 线 115 点、2 号异常 354 线 200 点、1 号异常 382 线 84 点原观察值分别为 100×10^{-9} 、 1×10^{-9} 、大于 100×10^{-9} , 新观察值分别为 1.26×10^{-6} 、 6.01×10^{-6} 、 10.16×10^{-6} , 地球化学指标多判别为矿化样,式(4)回归估值分别为 3.3×10^{-6} 、 3.02×10^{-6} 、 3.04×10^{-6} , 综合分析认为这些地段有金矿体,可安排工程验证。

5 结论

地球化学指标可较有效地区分矿体、矿化体、蚀变围岩,表 1 中的指标特征可作为重要的

地球化学评价标志。

金含量的定量预测模型可用于对样品的含金性作出评价。四个回归估值给出一致的结论时更有效,相差大时,矿化较差。

地球化学样品 Au、As、Sb、Hg 异常明显,而 Zn、Co、Ni、V、Mn 异常无或弱时,一般为矿(化)体;反之则多为蚀变围岩。

化探付样可用于评价异常,不失为一种快速有效的方法。

利用已有工程科学的组合采样,用较低的成本捕捉更多的成矿地球化学信息,进而预测矿体的延深(或延伸),评价异常。强调①有的放矢的科学组合采样;②指示元素、预测指标的正确选择(考虑与 Au 的相关性及本身的变异性);③地质特征(构造、岩性、蚀变、矿化等)、微量元素组成及异常发育程度、地球化学指标及定量预测结果等综合分析,得出较为客观的结论。

参考文献

- 1 赵利青. 界河金矿的构造地球化学预测. 见:阮天健、吴昌荣主编. 第五届全国勘查地球化学学术讨论会论文集,武汉:中国地质大学出版社,1995,48~51
- 2 张复新、马建泰、魏宽义. 镇安米粮地区微细浸染型层控金矿床的形成与构造演化的关系. 矿床地质,1995,14(1):26~34
- 3 张复新、刘文峰、魏宽义. 陕西丁一马矿带金龙山一丘岭金矿含金黄铁矿特征及其演化. 地质与勘探,1993,29(10):27~32

THE METHOD OF GEOCHEMICAL METALLOGENIC PROGNOSIS IN MINERALIZATION ALTERATION ZONE-TAKING JINLONGSHAN MICRO-FINE DISSEMINATED GOLD DEPOSIT

Zhao Liqing

(Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract

Gold mineralization usually accompanies with wall-rock alteration and is mostly controlled by faults or fractures. It reflects some elements' anomalies in geochemistry. In a area where certain gold mineralization bodies or gold ore bodies has been found and the general ore-controlling features of have been recognized, geochemists can collect composite samples scientifically, mainly mineralization alteration zone, analyse indicator elements, summarize geochemical indexes, set up the model of geochemical metallogenic prognosis based on the nature of elements' anomalies or linear productivity, the geochemical indexes or elements' ratios, the estimated values of gradual regression equations, and forecast the deep of known mineralization bodies or ore bodies, and evaluate the prospects of peripheral anomalies. The method is successful at Jinlongshan gold deposit which is a sediment-hosted micro-fine disseminated type gold deposit in Qingling Mountain.

Key words elemental geochemistry metallogenic prognosis alteration zone gold deposit
Jinlongshan