

阿西金矿床流体成矿的 元素地球化学标志*

滕彦国 张成江 倪师军

(成都理工学院, 成都, 610059)

摘要 采用中子活化分析方法, 系统测定了阿西金矿床矿石及围岩的微量元素含量, 讨论了热液流体作用下元素的地球化学行为及流体成矿的元素地球化学标志。认为金矿体赋存在成矿流体形成的地球化学界面附近。

关键词 流体, 元素地球化学, 金矿床, 阿西

成矿流体沿构造通道运移过程中, 必然要与周围岩石发生一系列物质和能量的交换, 从而在运移通道及两侧岩石中留下各种标志, 如蚀变岩石学标志、矿物学标志、元素地球化学标志等。其中元素地球化学标志是流体成矿定位的地球化学界面的集中体现, 它从本质上反映了流体作用的地球化学特征及成矿的地球化学过程, 因此是最直接、最可靠的标志。本项研究采集了阿西金矿床不同矿石品位区段6个剖面的39个岩矿石样品, 采用中子活化分析方法测定了30余种元素的含量, 旨在讨论流体作用过程中元素的地球化学行为, 建立流体成矿的元素地球化学标志。

1 矿床地质概况

阿西金矿床是川西北地区典型的微细粒浸染型矿床, 矿床位于秦岭-昆仑东西向复杂构造带西秦岭之南缘, 松潘-甘孜印支造山带北东部, 若尔盖中间地块北东缘的巴西复式背斜南翼。区内出露层为三叠系中统扎尕山群碳酸盐岩及砂板岩。印支期中酸性岩浆侵入呈岩株状或岩枝状产出的小岩体, 其中以让岩体规模最大, 为黑云母花岗闪长岩、石英闪长岩和花岗斑岩组成的复式岩体。金矿化受地层-构造-岩浆岩“三位一体”控制。根据矿体在岩体与围岩中的产出部位, 可分为产于岩体内和外接触带中两种。产于岩体内的矿体矿石品位较低。工业意义不大; 产于岩体外接触带中的矿体, 含矿岩石以交代石英岩、硅化复成分角砾岩为主。

* 国家自然科学基金项目(49873020)、国家“九·五”科技攻关项目(96-914-03-02)、国家计委科技找矿项目(JG947110-03)、国土资源部百名跨世纪科技人才培养计划基金联合资助

收稿日期 1999-03-17 改回日期 1999-05-16

第一作者简介: 滕彦国, 男, 1974年2月出生。博士生, 矿产普查与勘探专业。

阿西金矿床流体活动强烈。成矿期以富硅流体为主, 表现为强烈的硅化及含金石英脉的形成; 成矿后期流体富 CO_2 , 表现为广泛的碳酸盐化及穿插于含硅化蚀变岩中的方解石脉的形成^[1]

2 成矿元素地球化学标志

2.1 蚀变作用的成矿元素地球化学特征

蚀变程度不同岩石中成矿元素含量的明显差异, 是流体与岩石作用过程中, 流体体系物理化学条件改变的结果。成矿元素的聚散特征受岩性组合界面的分布形态和流体-岩石作用界面及作用强弱的控制。阿西金矿床蚀变可分为热接触交代变质和热液蚀变两种类型。

(1) 热接触交代变质主要表现为石灰岩的大理岩化、矽卡岩化。在热接触交代变质过程中成矿元素(Au、As、Sb、Ag)的含量(表 1)随变质程度的增强而逐渐增高。以 Au 为例, 大理岩(9.1×10^{-9}) < 弱矽卡岩化大理岩(12.6×10^{-9}) < 强矽卡岩化大理岩(24.0×10^{-9}) < 矽卡岩(42.55×10^{-9}), 尽管未形成工业矿体, 但仍暗示了热接触交代变质作用对金的富集具有积极作用。

(2) 热液蚀变表现为含金硅化蚀变带的形成。以砂岩为例, 在热液蚀变过程中成矿元素含量(表 1)随蚀变作用的增强显著富集, 金的含量变化尤为明显: 砂岩(16.3×10^{-9}) < 硅化砂岩(31.7×10^{-9}) < 交代石英岩(1452.28×10^{-9}), 显示了流体活动与金成矿的关系密切。

表 1 不同蚀变程度岩石中成矿元素含量

Table 1 Mineralizing element contents in different alteration rocks

成矿元素	热接触交代变质				热液蚀变		
	大理岩	弱矽卡岩化大理岩	强矽卡岩化大理岩	矽卡岩	砂岩	硅化砂岩	交代石英岩
$w(\text{Au})/10^{-9}$	9.1	12.6	24.0	42.55	16.3	31.7	1452.28
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	0.5	0.4	0.4	0.83	1.74	3.4	25.87
$w(\text{As})/10^{-6}$	179	12.6	15.6	105.1	151.85	119.6	18275.7
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	41.1	2.8	1.4	10.7	15.6	25.7	332.55

2.2 沿构造带方向流体活动的元素地球化学特征

选取 号矿化带中心部位砂岩及由砂岩硅化形成的硅化砂岩、交代石英岩等主要赋矿岩石为代表, 研究流体沿构造带方向运移的成矿元素地球化学标志。从该中心部位上的成矿元素含量变化曲线图(图 1)可见, Au、As、Sb、Ag 的变化具有一致的消长关系, 且具有中高(采场)两边低, 西高东低的特点。暗示流体活动西强东弱。

2.3 矿体两侧流体活动的元素地球化学特征

以矿化强烈, 矿体集中, 矿石品位较高的区段——采场剖面为例研究流体沿构造带运移

时侧向上的活动特点。 号采场剖面岩石类型较单一,且分布状态相对简单,即以交代石英岩为中心,两侧为硅化复成分角砾岩,再向外分别为闪长岩或大理岩。交代石英岩和硅化复成分角砾岩总体上构成了矿体。

号采场剖面中成矿元素分带性明显,表现为以矿体为中心,向两侧蚀变带中成矿元素含量逐渐减少(图2)。成矿元素的上述变化是成矿流体活动的宏观表现。矿体赋存部位是成矿流体活动最强烈地段,向两侧流体活动逐渐减弱,岩石蚀变程度随之减弱,流体成矿定位于流体活动的强弱界面及其附近。

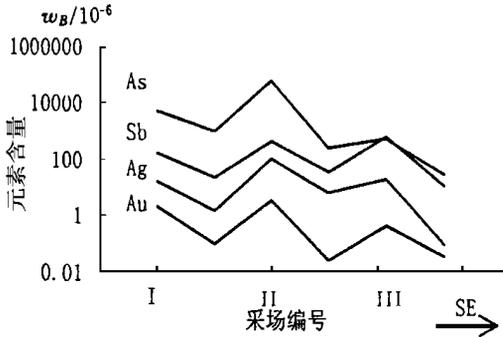


图1 号矿化带中心部位成矿元素含量变化图
Fig. 1 Ore-forming element contents in center of No. 2 mineralizing zone

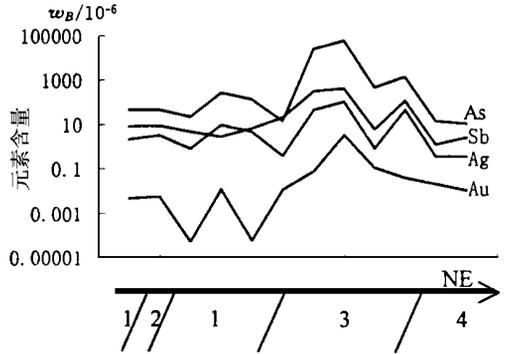


图2 号采场剖面成矿元素分布特征
Fig. 2 Mineralizing element distribution feature in No. 2 stope
1. 闪长岩 2. 矽卡岩 3. 矿体 4. 大理岩

3 稀土元素地球化学标志

稀土元素由于其特殊的地球化学性质,常被作为有效的地球化学示踪剂。研究表明,阿西矿床流体作用过程中稀土元素地球化学行为也具有明显的变化规律,稀土元素变化集中反映在流体成矿的地球化学界面及附近。深入研究这种变化规律,对于确定成矿流体活动的地球化学特征具有重要的意义。

3.1 不同岩石的稀土元素丰度

采用中子活化分析方法测定了岩矿石中8个稀土元素(La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、Lu)的含量(表2)。由该表中数据可见,矿床中矽卡岩的稀土元素含量最高,其次为交代石英岩和硅化复成分角砾岩,而未蚀变岩石的稀土元素含量较低,特别是轻稀土元素变化更加明显。矽卡岩中较高的稀土元素含量是由热接触交代变质作用形成较多富含稀土元素的矿物(石榴子石、绿帘石等)引起的。矿石(交代石英岩和硅化复成分角砾岩)中稀土元素的富集是成矿流体活动的结果。

表 2 阿西金矿床不同岩石中稀土元素含量及其参数

Table 2 REE contents and parameters of different rocks in A xi gold deposit

元素及参数	交代石英岩	砂岩	硅化复成分角砾岩	大理岩	闪长岩	砂卡岩
La	72.89	46.64	71.12	31.08	44.35	76.57
Ce	88.94	64.43	75.20	44.30	58.85	100.93
Nd	22.42	31.5	26.22	24.79	26.47	49.72
Sm	3.03	4.93	3.66	4.21	3.68	6.23
Eu	$w_B/10^{-6}$ 0.49	0.83	0.56	0.81	1.11	0.74
Tb	0.39	0.72	0.568	0.74	0.58	0.93
Yb	0.71	1.77	1.48	1.60	1.13	1.91
Lu	0.13	0.25	0.21	0.24	0.17	0.37
REE	188.61	151.07	179.02	107.77	136.34	237
$w(\text{La})/w(\text{Yb})$	102.66	26.35	48.05	19.43	39.25	40.09
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	11.29	2.9	5.29	2.13	4.32	4.41
$w(\text{La})/w(\text{Nd})$	3.25	1.48	2.71	1.25	1.54	1.54
$(\text{La}/\text{Nd})_N$	6.28	2.86	5.24	2.42	2.98	2.98
Ce^0	4.84	2.85	3.03	2.55	2.96	2.67
Eu^0	0.20	0.19	0.20	0.21	0.58	0.10

注 REE 表示的是 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、Lu 八个元素的总量

稀土的分异特征是流体活动过程的重要标志。分别以 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 或 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $w(\text{La})/w(\text{Nd})$ 或 $(\text{La}/\text{Nd})_N$ 代表轻重稀土和轻稀土的分异, 其中 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{La}/\text{Nd})_N$ 是地球颗粒石标准化后的值, 计算结果见表 2。不同岩石中 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 均 > 19 , $(\text{La}/\text{Yb})_N > 2$, 可见轻重稀土分异显著; $w(\text{La})/w(\text{Nd}) > 1.2$, $(\text{La}/\text{Nd})_N > 2.4$, La/Nd 比值越大, 流体作用越强烈^[2]。同时不同蚀变岩石 La/Yb 和 La/Nd 的变化具有一致的规律, 表现为交代石英岩 $>$ 硅化复成分角砾岩 $>$ 砂卡岩 $>$ 砂岩 $>$ 大理岩。这一结果表明成矿流体的活动造成了轻重稀土和轻稀土的分异。

流体系统物理化学条件的改变可以用 Ce^0 和 Eu^0 粗略加以描述, Ce^0 和 Eu^0 表示为^[2]:

$$\text{Ce}^0 = \frac{\text{Ce}}{\text{La} \times \text{Nd}}, \text{Eu}^0 = \frac{\text{Eu}}{\text{Sm} \times \text{Nd}}$$
阿西金矿床中 Ce^0 的变化情况与 La/Yb 和 La/Nd 基本一致, 反映了流体成矿过程体系 Eh 值和 pH 值的改变, 矿石中 Ce^0 较高, 表明流体成矿时体系是弱氧化、弱酸性的环境; Eu^0 均表现为负 Eu 异常, 但变化规律不明显。

3.2 流体活动的稀土元素标志

利用 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 可以研究热液流体的循环特征^[3]。阿西金矿床的 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 与 $w(\text{Au})$ 具有一定的相关关系, 且岩石和矿石表现为两种不同的演化系列(图 3)。当 $w(\text{Au})$ 含量大于 100×10^{-9} 时, $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 比值变化范围较大 ($1.33 \sim 1600.3$), $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 的相关性表现为趋势线 2, 它代表了流体成矿过程中轻重稀土的分异演化趋势; $w(\text{Au})$ 含量小于 100×10^{-9} 时, $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 比值变化范围相对较小 ($10.2 \sim 105.7$), 此时 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 的关系表现为趋势线 1, 代表流体与围岩作用过程轻重稀土的分异特征。岩矿石中 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 不同的演化趋势反映了稀土元素经历的地球化学作用的差异及在同一种

地球化学作用中由于岩石性质的不同而导致的稀土元素分异的不同。

$w(\text{La})/w(\text{Nd})$ 比值反映了轻稀土的分异特征, 是流体作用强弱的地球化学标志。 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Nd})$ 的关系(图4)及 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 的趋势基本一致。稀土元素的这种演化规律可能与流体活动过程中流体的性质突变有关, 即在成矿部位, 由于流体的地球化学性质发生突变, 导致 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 和 $w(\text{La})/w(\text{Nd})$ 比值的迅速增大。流体性质突变的地球化学界面往往是成矿元素集中堆积的重要场所。

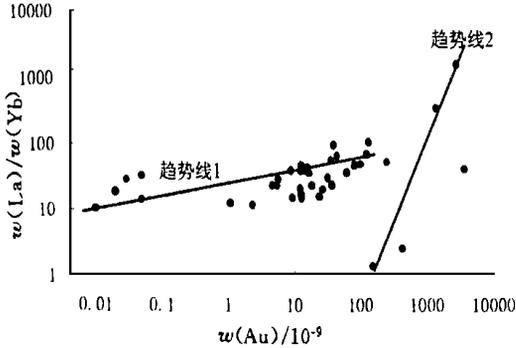


图3 阿西金矿床中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 图解

Fig. 3 Relations between $w(\text{Au})$ and $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ in Axi deposit

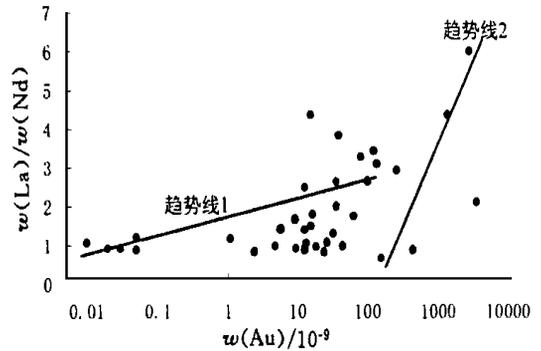


图4 阿西金矿床中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{La})/w(\text{Nd})$ 图解

Fig. 4 Relations between $w(\text{Au})$ and $w(\text{La})/w(\text{Nd})$ in Axi deposit

4 微量元素地球化学标志

我们选用流体作用过程中比较敏感的元素组合(Zr 、 Hf 、 Rb 、 Sr 等)来研究成矿流体的活动对这些元素地球化学行为的影响, 并根据其与 Au 的对应关系, 详细研究流体作用过程所留下的微量元素地球化学标志, 这些标志是流体成矿定位地球化学界面的体现。

4.1 Zr/Hf 标志

Zr 和 Hf 的原子结构和主要地球化学参数十分接近, 因此在地质作用过程中, 它们的地球化学特点非常相似, 二者密切相伴(刘英俊, 1987), 但在成矿流体作用过程中 Zr 和 Hf 的活动性不同, 从而导致 Zr 和 Hf 的分离, $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 比值反映了其分离的程度, 也是流体作用过程的有效标志。

阿西金矿床岩石 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 的关系如图5。由图可见, 矿石中的 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值较高, 表明流体作用过程中 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 变化明显, 但矿石中金含量与 Zr/Hf 并非正消长关系, 而是负消长关系, 这可能与 Zr 、 Hf 及 Au 自身的地球化学性质有关。

4.2 Rb/Sr 标志

温度较低的热液作用对 Rb 没有特殊的意义, 而 Sr 在热液作用中则趋向富集^[4], 因此, Rb/Sr 也是成矿流体活动的重要标志。

阿西金矿床岩矿石中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 的关系明显(图 6), 尤其在矿石中 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 的值较岩石中略低, 并表现为正消长关系, 反映了含金流体成矿过程中, Rb 、 Sr 的地球化学行为的改变。

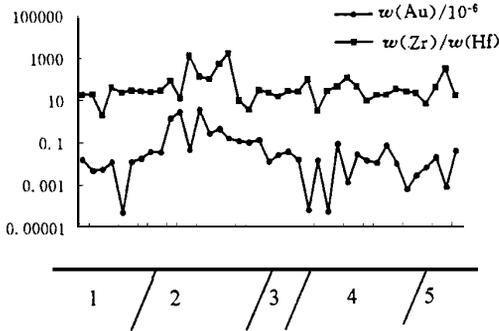


图 5 阿西金矿床中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 相关图

Fig. 5 Relations between $w(\text{Au})$ and $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ in A xi deposit

1. 闪长岩 2. 矿石 3. 砂岩 4. 大理岩 5. 砂卡岩

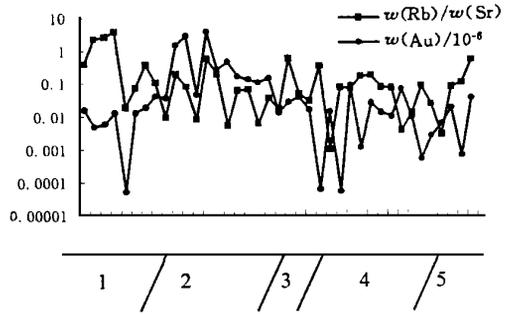


图 6 阿西金矿床中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 相关图

Fig. 6 Relations between $w(\text{Au})$ and $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ in A xi deposit

1. 闪长岩 2. 矿石 3. 砂岩 4. 大理岩 5. 砂卡岩

4. 3 流体作用过程中 Sc 的元素地球化学行为

Sc 是典型的分散元素, 也是中子活化分析较准确的元素之一, 利用 Sc 的地球化学性质和行为可以研究成矿流体作用过程。岩浆期后气成-热液作用中, 在许多场合发生 Sc 的明显集中, 主要是钠长石化花岗岩、砂卡岩、碳酸岩等形成的矿物中^[5], 阿西金矿中 Sc 明显富集。阿西金矿床岩矿石中 Sc 的行为也遵循这一规律(图 7), 即在蚀变闪长岩和砂卡岩中 Sc 明显富集。

低温条件下, 当缺少足够量的 F 和 CO_2 时, Sc 的带出和迁移是困难的^[4], 阿西金矿床主成矿期流体主要富 Si , 不利于 Sc 的富集, 因此矿石中 Sc 的含量明显较围岩低。

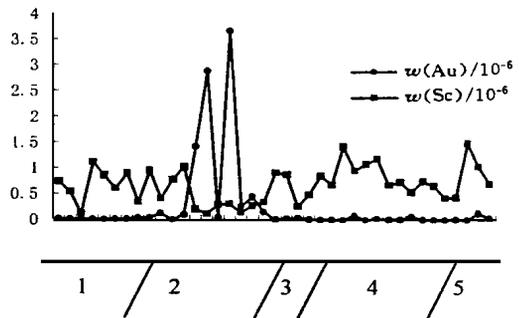


图 7 阿西金矿床中 $w(\text{Au})$ 与 $w(\text{Sc})$ 关系图

Fig. 7 Relations between $w(\text{Au})$ and $w(\text{Sc})$ in A xi deposit

5 结 论

根据成矿流体活动过程对元素地球化学行为的影响, 建立了成矿流体活动的元素地球化学标志, 这些标志反映流体的性质、体系条件演化过程。该区金成矿的元素地球化学标志如下:

(1) 成矿元素地球化学标志: Au 、 As 、 Ag 、 Sb 在不同岩石中的含量与成矿流体活动强弱具有一致的变化规律, 成矿流体活动越强, 成矿元素含量越高。

(2) 稀土元素地球化学标志: La/Yb 、 La/Nd 、 REE 、 Ce^0 和 Eu^0 与流体活动及流体性质演化关系明显, 其中流体活动最重要的稀土元素标志是 La/Yb 、 La/Nd ;

(3) 微量元素地球化学标志: Zr/Hf 和 Rb/Sr 的变化反映了和流体活动的过程和特点。流体成矿过程中, Zr/Hf 值升高, 但与 Au 含量显示了负相关关系; Rb/Sr 值降低, 但与 Au 呈正相关关系。

本文岩矿石样品由四川省、地矿部地学核技术应用开发重点实验室中子活化分析室测定, 在此致谢。

参考文献

1. 张成江, 倪师军. 阿西金矿床流体活动踪迹及找矿信息. 四川省地学核技术应用开发重点实验室年报. 成都: 成都科技大学出版社, 1996, 43 ~ 45
2. 汪云亮, 等. 铈异常(Ce^0)和轻稀土分异(La/Nd)双对数图解的旋转变换. 物探化探计算技术, 1996, 18(增刊): 50 ~ 53
3. 季宏兵, 王世杰, 李朝阳, 等. 松潘-甘孜造山带中巴西金-砂卡岩矿床成矿热液系统演化(REE 、 Sr 、 O)证据. 矿物学报, 1997, 17(4): 412 ~ 421
4. 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 1987, 1 ~ 281
5. 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984, 187 ~ 194

ELEMENTAL GEOCHEMICAL MARKS OF ORE-FORMING FLUID ACTIVITIES IN A XI GOLD DEPOSIT

Teng Yanguo Zhang Chengjiang Ni Shijun

(*Chengdu University of Technology, Chengdu 610059*)

Abstract

By using INAA method to detect elements contents of ores systematically, we study the geochemical behaviors and marks of elements in fluid activity for A xi gold deposit. The conclusion shows that gold ore bodies locate in the geochemical interfaces that result from the movement of mineralizing fluids.

Key words fluid, elemental geochemistry, gold deposit, A xi