

蚀变岩 Au - Ag 相关性及其在资源评价中的应用^{*}

高帮飞¹ 周迎春² 郭春影¹

(1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室; 2. 海南省地质调查院)

摘 要 典型 Au、Ag 矿床的统计研究发现, 蚀变岩 Au - Ag 相关性对矿床的矿化类型有指示作用, 即 Au - Ag 相关系数高, Au 和 Ag 可以同时成矿; Au - Ag 相关系数低, Au 或 Ag 独立成矿。理论和实例分析表明, 热液蚀变过程中 Au、Ag 的分异, 主要与 Au、Ag 元素地球化学性质、初始岩石建造特征以及热液来源和演化等有关。Au - Ag 相关性较蚀变岩石 Au/Ag 比值更能反映热液流体的叠加作用。运用该方法可以推断矿床潜在矿化类型, 对已有矿山的探矿增储及资源综合利用有一定的指导意义。

关键词 Au - Ag 相关性 分异 矿化类型 资源预测

Au-Ag Relativity of Altered Rocks and Its Application in Resource Evaluation

Gao Bangfei¹ Zhou Yingchun² Guo Chunying¹

(1. China University of Geosciences 2. Hunan Institute of Geological Survey)

Abstract The statistical results of typical Au, Ag deposits reveal that the relativity between gold and silver elements (RGSE) of altered rocks plays a role of indicating the mineralization type of deposit. When RGSE is high, both Au and Ag can have a content required for economic ore bodies while RGSE is low, only Au or Ag can be of economic significance. The theoretical and practical analysis indicates that the differentiation of Au from Ag may result from their difference in geochemical properties, primary rock formation characteristics and the origin and evolution of the hydrothermal fluids. RGSE can better reveal the superposition of multi-phases of mineralized fluids than Au/Ag ratio. It is of guidance significance to the application of RGSE to infer the potential mineralization type of deposits, to the exploration for reserve expansion of the existing mines and to the resource comprehensive utilization.

Keywords Au-Ag relativity, Differentiation, Mineralization type, Resource forecast

Au 和 Ag 是地球化学性质十分相近的 2 个元素, 它们在热液成矿作用常常密切伴生。然而由于成矿作用的复杂性, 蚀变岩(矿石)中 Au 和 Ag 元素含量并不一定表现为良好的正相关关系。在同一矿田或同一矿床平面或剖面的不同部位, Au、Ag 矿化在空间上常出现明显的分离^[1-2]。研究者常以 Au/Ag 比值探讨金矿床的分带性、成矿作用时空变化规律及矿体延深评价等工作^[3]; 而对于存在 Au、Ag 矿化叠加作用地段, 由于岩石中初始 Au/Ag 比值的制约, 简单运用 Au/Ag 难以预测某一区域是 Au 还是 Ag 的矿化区^[4]。笔者在研究海南岭壳铜(金、银)矿床时发现蚀变岩中元素的相关性对矿化类型有着较好的指示作用^[5]。本研究即在上述工作基础上, 以国内外典型矿床热液蚀变岩中 Au - Ag 相关性与矿化类型的统计研究为基础, 通过矿床实例分析, 探讨 Au - Ag 共生分异机理以及在预测矿山潜在资源中的应用。

1 Au - Ag 相关性与矿化类型的关系

选取安徽铜陵铜多金属矿集区(鸡冠石、冬瓜山、花树坡、大团山、曹山、包村)、胶东招平金断裂成矿带(大磨曲家、大尹格庄)、内华达 Tuscarora Au - Ag 矿区、广东河台金矿床、海南岭壳铜(金、银)矿床等典型矿床蚀变(矿石) Au - Ag 元素数据, 计算了各矿床 Au - Ag 相关系数(表 1)。由表 1 可见, 当矿床已知矿化类型为 Au 和 Ag (Au - Ag 同时成矿)时, 也即可以同时圈定 Au 矿体和 Ag 矿体, Au - Ag 相关系数较高, 均大于 0.6 (大尹格庄金矿床号矿体 Au - Ag 相关系数高达 1)。当矿床中已知矿化类型为 Au 或 Ag (Au、Ag 独立成矿)时, 也即 Au

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 40572063), 教育部跨世纪人才基金项目和教育部分子科学技术研究重点项目(编号: 03178)。

高帮飞(1981—), 男, 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 博士研究生, 100083 北京市海淀区学院路 29 号杨立强收转。

和 Ag中只有一种元素能圈出独立矿体 (另外一种元素以矿化形式伴生),除大团山,包村和毛堂金矿床外,其余各矿床蚀变岩石样品的 Au - Ag相关系数均低于 0.5,绝大部分低于 0.3。

表 1 已知矿床的矿化类型及其蚀变岩 Au - Ag相关性

矿床	岩 性	已知矿化类型	Au - Ag相关系数	推断存在矿体(化)体
鸡冠石 ^[6]	蚀变闪长岩、夕卡岩	Ag - Au	0.95	Ag - Au
冬瓜山 *	蚀变闪长岩、夕卡岩	Cu - Au	0.23	Au(Ag)
花树坡 *	大理岩、夕卡岩	Cu - Au(Ag)	0.21	Au(Ag)
大团山 *	大理岩、夕卡岩	Cu - Au	0.8	Au - Ag
曹山 *	蚀变闪长岩、夕卡岩	S - Au	0.12	Au(Ag)
包村 *	蚀变闪长岩、夕卡岩	Au	0.77	Au - Ag
Tuscarora ^[7]	蚀变火山岩	Au - Ag	0.68	Au - Ag
岩上 ^[8]	粘土质矿石、碳酸盐质矿石	Au	- 0.12	Au(Ag)
北岔沟门 ^[9]	多金属矿石	Cu - Ag	0.49	Ag(Au)
河台 ^[3]	蚀变糜棱岩	Au	0.15	Au(Ag)
毛堂 ^[4]	矿石硫化物	Au	0.71	Au - Ag
甲乌拉 ^[4]	矿石硫化物	Ag	0.03	Ag(Au)
香花岭 ^[4]	矿石硫化物	Ag	- 0.64	Ag(Au)
蒲塘 ^[4]	矿石硫化物	Au	0.28	Au(Ag)
牛圈 ^[4]	矿石硫化物	Ag(Au)	0.25	Ag(Au)
青羊沟 ^[4]	矿石硫化物	Ag	- 0.27	Ag(Au)
大磨曲家(本研究)	蚀变花岗岩、黄铁绢英岩	Au	0.28	Au(Ag)
大尹格庄黄铁绢英岩(号矿体)		Au - Ag	1	Au - Ag
(本研究)黄铁绢英岩(号矿体)		Au	0.66	Au(Ag)
海南岭壳	蚀变流纹质角砾熔岩	Cu - Ag	0.19	Ag(Au)
(本研究)	蚀变花岗闪长岩	Cu - Au	0.08	Au(Ag)

注:表中 Au - Ag表示同时存在 Au矿体和 Ag矿体, Au(Ag)表示只有 Au矿体, Ag为伴生元素, Ag(Au)同理; * 数据引自 321 队。

根据各矿床的已知矿化类型,将数据分成 2 组,一组为已知同时存在 Au、Ag 矿体的数据 (317 对),另一组为已知只独立存在 Au 或 Ag 矿体的数据 (648 对)。从 Au - Ag 关系图上可以看出 (图 1), Au、Ag 同时成矿时, Au - Ag 呈明显正相关关系;而 Au、Ag 独立成矿时, Au - Ag 相关性不明显,相关系数仅为 0.15,整体上呈现此消彼长的趋势。综上, Au - Ag 相关性与蚀变岩石矿化类型表现为: Au - Ag 相关系数高时, Au 和 Ag 可以同时成矿;而 Au - Ag 相关系数低时, Au 或 Ag 中的一个成矿。

2 Au、Ag 分异机理

归纳起来,热液蚀变过程中 Au、Ag 的分异,主要与 Au、Ag 元素地球化学性质、初始岩石建造特征以及热液来源和演化等有关。

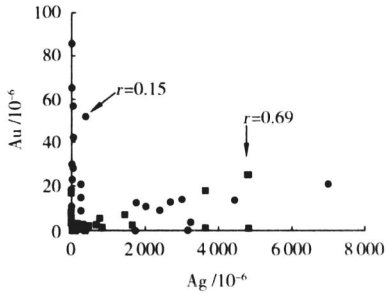


图 1 蚀变岩石 (硫化物) Au - Ag 关系
- Au、Ag 独立矿; - Au、Ag 同时成矿

2.1 Au、Ag 元素地球化学性质差异

Au、Ag 具有相似的化学性质,可以完全类质同像,但热液作用过程中二者富集速率以及在亲铁性、与不同承载矿物关系等方面的不同导致它们分离^[4]。Au 主要分布于黄铁矿中,其次在黄铜矿中。Ag 主要分布于方铅矿中,其次在闪锌矿中。

2.2 初始岩石建造的 Au、Ag 含量差异

Au 元素大多赋存于基性岩中,绝大部分 Au 矿床都与上地幔来源的超基性、基性火山岩有关。世界上的 Au 矿床主要产在前寒武纪绿岩地体中。太古宙绿岩地体中很少有共生的 Au - Ag 矿床,也没有独立 Ag 矿床。中生代是中国与火山岩 - 次火山岩有关的 Ag 矿床形成的鼎盛时期^[4]。

2.3 热液作用的多期多阶段性

热液作用过程中, Au 主要在中 - 高温阶段富集,而 Ag 主要在中 - 低温阶段富集成矿^[10]。矿石中金 - 银系列矿物金成色能够反映矿化流体温度的高低^[11],即金成色越高,温度越高。由图 2 可见, Au - Ag 共生 (同时成矿) 时,金银矿物 Au/Ag 较小而集中,即成色较低,可能为一期中低温流体作用的结果。而 Au、Ag 分离而独立成矿时, Au/Ag 可以分为 20 ~ 60 和 0 ~ 20 2 组,即高低不同的 2 种成色,为中高温和中低温矿化流体叠加的结果。

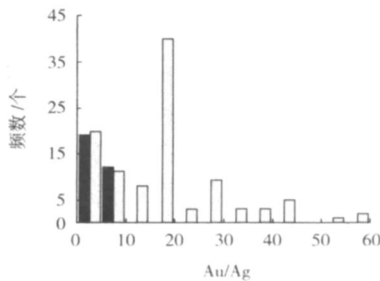


图 2 金矿床金 - 银系列矿物 Au/Ag 比值

■ - Au、Ag 同时成矿; □ - Au、Ag 独立成矿

(Au/Ag 与金成色 (1 000 Au / (Au + Ag)) 成正相关关系)

3 典型矿床实例分析

3.1 大尹格庄金(银)矿床

大尹格庄金矿床为胶西北部典型的蚀变岩型金矿床。矿体由玲珑黑云母花岗岩蚀变而来,以大尹格庄断裂为界,断裂南部的 号矿体以 Au - Ag 矿化为主,断裂北部的 号矿体以 Au 矿化为主^[2]。

矿石微量元素因子分析结果见表 2。以 Au 矿化为主的 号矿体, F1 为中低温元素组合特征,显示 Au 矿化与中温的黄铜矿化有关; F5 中 Au - Mo 为中高温元素组合特征,但高温阶段 Au 矿化不好,该因子的累计方差贡献较小,仅为 0.09,不代表 Au 主要的矿化作用,可能为 Au 的预富集阶段。F2 为低温元素组合; F3 和 F4 可能指示了幔源元素特征,与矿化期幔源流体参与有关。而 号矿体中 F1: Au - Ag - As - Bi - Co - Cr - Pb 的组合中,与 号矿体 F1 因子不同的是加入了幔源元素 Co - Cr,同时 Au - Pb 代替了 Au - Cu,可能与较晚期的方铅矿化叠加作用有关,为低温的矿化特征。F2 和 F3 因子都表现为低温元素 As - Hg - Sb 对中高温 Cu, Mo 元素的叠加,并且也继承早期蚀变岩石幔源元素组合特征。F4 为高温元素,没有显示与矿化有关。

表 2 大尹格庄金矿床、号矿体微量元素因子分析

矿体	矿化	主因子(累计方差贡献)
号矿体	Au - Ag	F1: Au - Ag - As - Bi - Co - Cr - Pb(0.32) F2: As - B - Cu - Hg - Mn - Zn(0.27) F3: B - Co - Cr - Mo - Ni - Sb(0.22) F4: W(0.09)
号矿体	Au	F1: Au - Ag - As - Bi - Cu(0.24) F2: Pb - Zn - Hg(0.17) F3: B - Co - Mn(0.14) F4: Cr - Ni(0.13) F5: Au - Mo(0.09)

因此,大尹格庄金(银)矿床 号和 号矿体是由玲珑花岗岩经矿化流体叠加而形成的。 号矿体以中温矿化元素组合为特征,矿化作用叠加了早期中高温蚀变;而 号矿体以中低温元素组合为特征,除与 号矿体类似的中温 Au 矿化外,宏观上存在明显的方铅矿化和 Ag 矿化叠加。因而代表相对早期高温的 号矿体中,矿化以 Au 矿化为主,Au、Ag 产生了分离,Au - Ag 相关性相对较差。而 号矿体代表相对晚期低温 Au - Ag 矿化,由于温度相对较低金、银显示了较好的相关性。

3.2 岭壳铜(金、银)矿床

与大尹格庄金矿床不同的是,海南岭壳铜(金、银)矿床的赋矿围岩不是同一岩性岩石蚀变而来,

而是与不同期的中低温热液活动有关。已知的 Cu、Ag 矿体都产在早期流纹质角砾熔岩中,而 Cu、Au 矿体与晚期花岗闪长岩有关(表 1)。

蚀变流纹质角砾熔岩中 F1 和 F4 因子主要为中高温元素组合, F2 为典型的中低温元素组合, F3 系幔源元素组合(表 3)。可见,Au、Ag 发生了分异,Au 与中高温元素 Bi 密切相关,而 Ag 则表现在中低温阶段富集。蚀变花岗闪长岩继承了早期蚀变流纹质角砾熔岩中高温元素组合以及幔源元素组合特征,但 Au 和 Ag 位置发生了变化。Ag 与中高温元素关系密切(F1),而 Au 则与中低温元素密切共生(F2)。因而,形成了蚀变流纹质角砾熔岩中以中低温 Ag 矿化为主,而蚀变花岗闪长岩中则以中低温的 Au 矿化为主。

表 3 海南岭壳铜(金、银)矿床微量元素因子分析

岩种	矿化	主因子
蚀变流纹质角砾熔岩	Cu - Ag	F1: W - Sn - Cu - As - Hg(0.25) F2: Ag - Sb - Pb(0.18) F3: Mn - Fe(0.11) F4: Au - Bi(0.22)
蚀变花岗闪长岩	Cu - Au	F1: Ag - Hg - W - Bi - Cu - Zn(0.3) F2: Au - Sb - Pb(0.17) F3: Mn - Fe(0.14) F4: Sn - As(0.13)

4 结 论

(1) Au - Ag 相关系数高时,Au 和 Ag 可以同时成矿; Au - Ag 相关系数低时,Au 或 Ag 中的一个成矿。

(2) 同一矿床 Au - Ag 分异,主要受控于 2 元素地球化学性质,以及不同岩石(矿物)富集 Au、Ag 能力差异(如岭壳铜矿床)或者多期多阶段流体对同一岩石的改造程度差异(如大尹格庄金矿床)。

(3) Au - Ag 相关性与蚀变岩石 Au/Ag 比值没有直接联系;与自然金(银)矿物成色之间的关系如下:独立成矿时(Au - Ag 相关性强),流体叠加作用强,成色较高;同时成矿时(Au - Ag 相关性弱),流体叠加作用弱,成色较低。

运用上述结论,对表 1 中各矿床的矿化类型进行了预测,结果也列在了表 1 中。大团山、包村和毛堂金矿床 Au - Ag 相关性均大于 0.7,推测这些金矿床中可能存在独立的 Ag 矿体。冬瓜山、岩上、北岔沟门、河台、甲乌拉、香花岭、蒲塘、青羊沟、大磨曲家、大尹格庄(号矿体)和岭壳诸矿床 Au - Ag 相关系数小,推测可能分别有伴生的 Au 或 Ag 矿化。

应当说明的是,利用 Au - Ag 相关性来判断

矿床潜在矿化类型主要根据已知矿化类型推断未知矿化类型,因而该方法主要应用于已知矿区的资源预测和已有矿山的探矿增储及资源综合利用。

Au - Ag 相关性虽然能揭示矿化叠加作用,但无法刻画矿化强度,因此还需结合其它地质地球化学资料来指导矿产勘查。其它地球化学性质相近的元素是否也具类似规律,尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张 生,李锦锦,陈义兵.长坑矿床矿化过程中元素的质量迁移及金银关系[J].地质找矿论丛,1997,12(3):33-40.
- [2] 李德秀,高帮飞,刘 琰,等.大尹格庄金矿床构造控矿规律及找矿意义[J].地质与勘探,2006,42(4):32-35.
- [3] 李兆麟,翟伟,黄栋林,等.河台金矿床垂深及横向剖面 Au 及伴生微量元素地球化学特征及矿床深部评价[J].地球化学,2002,31(5):473-480.
- [4] 冯建忠,曾益善,雒利平.成矿作用中金银的共生与分离及

Au/Ag 比值的校正[J].地质地球化学,2000,28(1):20-27.

- [5] 周迎春,高帮飞,杨朝云.海南岭壳铜矿床赋矿岩体元素分布特征及意义[J].金属矿山,2006(增刊):29-32.
- [6] 储国正,吴言昌,刘光华,等.安徽铜陵鸡冠石银(金)矿床地质地球化学特征[J].地质地球化学,2000,28(3):31-40.
- [7] Castor S B, Boden D R, Henry C D, et al The tuscarora Au-Ag district: eocene volcanic-hosted epithermal deposits in the carlin gold region, Nevada[J]. Economic Geology, 2003, 98: 339-366.
- [8] 刘建中.贵州灰家堡金矿田 Au/Ag 比值特征及找矿意义[J].贵州地质,1999,16(2):97-102.
- [9] 毛德宝,钟长汀,武永平,等.冀北北岔沟门铅锌多金属矿床地质特征及成因[J].地质调查与研究,2005,28(4):228-239.
- [10] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京:地质出版社,1987.
- [11] 滕彦国,张成江,倪师军,等.田湾金矿带流体成矿与金成色的关系研究[J].黄金,2000,21(4):5-7.

(收稿日期 2008-05-23)

(上接第 23 页)

若显著水平 $\alpha = 0.01$, 相关系数临界值 $r_{\alpha} = 0.5972$, 而由实验数据求得的相关系数 $r = 0.9943 > 0.5972$, 线性关系很好,其适用条件为 $4.0 \text{ g/L} < \text{矿化度} < 5.2 \text{ g/L}$ 。

3.3 模型应用实例及效果分析

配制相同的溶浸液反复进行室内地浸采铀模拟试验,在不同时刻取溶浸液样分析其常规离子含量和电导率值。根据常规离子含量求出其矿化度值,同时把电导率值代入式(2)求得矿化度的计算值,见表 4。

表 4 溶浸液的模型计算的矿化度与分析矿化度对比

编号	电导率 ($\mu\text{s/cm}$)	矿化度/(g/L)			相对偏差 /%
		计算值	分析值	差 值	
1	3 820	4.136 3	4.205 6	0.069 3	1.65
2	3 900	4.336 3	4.381 1	0.044 8	1.02
3	3 970	4.511 3	4.578 2	0.066 9	1.46
4	3 910	4.361 3	4.411 5	0.050 2	1.14
5	3 950	4.461 3	4.504 2	0.042 9	0.95
6	3 950	4.461 3	4.504 7	0.043 4	0.96
7	3 970	4.511 3	4.561 4	0.050 1	1.10
8	3 980	4.536 3	4.625 7	0.089 4	1.93
9	4 010	4.611 3	4.671 4	0.060 1	1.29
10	4 020	4.636 3	4.701 2	0.064 9	1.38

由表 4 可看出,模型计算的矿化度值和水样分析的矿化度值的相对偏差为 0.95% ~ 1.93%。该关系模型具有较高的精度,能够满足室内地浸模拟试验和下一步现场地浸工作的需要。

4 结 论

(1)通过测定溶浸液的电导率推算矿化度值是可行的,它使得矿化度的测定工作方便、快捷,而且节约了人力财力。

(2)室内地浸采铀模拟试验过程中,由于溶浸液与铀矿样之间的水岩作用,溶浸液阴阳离子的比例关系略有变化,但水化学类型不变,所以此回归方程可以反映溶浸过程中电导率与矿化度的线性关系。

(3)此方法必须注意到它的局限性。不同类型的溶液,电导率和矿化度值的相关关系是不同的,回归方程也不同,同时它对于矿化度值的使用范围也有限制。

参 考 文 献

- [1] 季 方,马英杰,樊自立.塔里木河干流水质矿化度换算方法研究[J].环境科学,1998,19(6):37-40.
- [2] 周国强,王 强.浅层地下水矿化度测定方法的探讨[J].环境工程,2003,21(3):65-67.
- [3] 史维浚,孙占学.应用水文地球化学[M].北京:原子能出版社,2005.
- [4] Mohsen Jalali Assessment of the chemical components of Famenin groundwater, wster Iran [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(5): 357-374.
- [5] 鲁光四,等.水质监测分析方法[M].北京:学术书刊出版社,1989.

(收稿日期 2008-05-13)