

扬子地台北缘中段中上元古界中 金银矿床成矿地球化学研究^①

汪东波

(北京矿产地质研究所)

摘 要

根据矿化元素及矿物组合, 扬子地台北缘中段中上元古界中的金银矿床可划分为四类: 1. Au-Ag-Pb-Zn 型; 2. Au-Ag-Te 型; 3. 含 Au-石英脉型; 4. Au-Ag-Pb-Zn-黄铁矿-重晶石型。通过系统的地层含金银性评价, 确立了武当山群杨坪组、挡鱼河组上亚组、碧口群酸性火山岩为有利金银矿化产出的层位, 他们控制着区内金银矿化。文中还给出了四类矿床的成矿物理化学条件、稳定同位素 (S、Pb、H、O、C) 组成, 剖析了各类矿床的成矿物质和成矿流体来源, 并对其成因进行了初步探讨。

关键词: 扬子地台北缘 中上元古界 金银矿床 含金银性评价 成矿物理化学条件 稳定同位素 地球化学

1 区域地质背景及金银矿床概况

扬子地台北缘中段横跨两大构造单元, 武当山-安康地区位于秦岭褶皱系的南侧, 陕南勉略地区位于松潘-甘孜褶皱系的中摩天岭褶皱带的东端北缘。该区北接秦岭地槽, 西邻祁连-昆仑褶皱系, 南以阳平关-勉县-城口-房县大断裂与扬子地台为界, 东抵南襄盆地 (见图 1)。

区内除广泛分布的中上元古界外, 尚有古生界、中生界出露。中上元古界, 在武当山地区为武当山群, 在安康地区为郧西群, 在勉略一带为碧口群^[1]。武当山群从下至上可分为楼台组、挡鱼河组和杨坪组。楼台组以变石英角斑质凝灰岩、变凝灰质长石砂岩、石英长石砂岩为主; 挡鱼河组下亚组为变基性火山岩,

上亚组为变石英角斑质晶屑凝灰岩-石英角斑岩系列。杨坪组为一套富含硫、磷、碳的负变质岩。郧西群主要为变石英角斑质角砾岩、凝灰岩和石英角斑岩, 具明显的韵律性喷发特征。碧口群主要由中基性-中酸性火山岩以及正常沉积岩组成, 上元古界耀岭河群在武当山地区主要由基性火山岩组成, 夹冰碛砾岩和粉砂质泥岩, 在安康地区主要由一套富钠的基性熔岩夹角砾岩、凝灰岩组成。

区内岩浆活动强烈。中晚元古代, 强烈岩浆喷发形成海相火山沉积岩系。其岩浆侵入活动形成从酸性到基性、超基性侵入体, 侵入时间从晋宁期到燕山期, 其中以加里东期最为重要。

区域构造形迹复杂, 主要构造为 NE、NW 及近 EW 向的断裂构造, 他们控制着区内岩浆活动及矿化作用。

^①于 1992 年 3 月 8 日收到

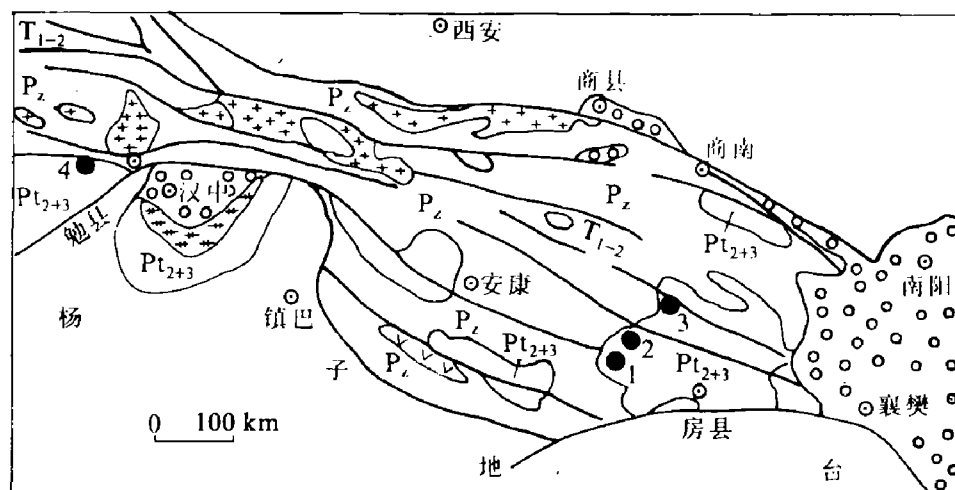


图1 区域地质简图 (据张国伟等, 1988 改编)

Q—第四系; T₁₋₂—中下三叠统; P_z—古生界; Pt₂₊₃—中上元古界; $\begin{smallmatrix} + & + \\ + & + \end{smallmatrix}$ —花岗岩类; $\begin{smallmatrix} \# & \# \\ \# & \# \end{smallmatrix}$ —汉南杂岩体;
 $\begin{smallmatrix} \vee & \vee \\ \vee & \vee \end{smallmatrix}$ —碱性-基性岩类; $\parallel$ —断层及地质界线; $\bullet_i$ —重要的金银矿床及编号
 (下标 i: 1—银洞沟; 2—许家坡; 3—白岩沟; 4—东沟坝)。

表1 中晚元古代地层中主要金银矿床类型及特征

矿床类型	Au-Ag-Pb-Zn 型	Au-Ag-Te 型	含 Au-石英脉型	Au-Ag-Pb-Zn- 黄铁矿-重晶石型
赋矿围岩	中元古界武当山群 挡鱼河组上亚组变石 英角斑质凝灰岩类	中上元古界武当山 群杨坪组变凝灰质砂 岩、泥质粉砂岩等	上元古界耀岭河群 变细碧岩、绿泥钠长 片岩	中上元古界碧口群 变石英角斑质凝灰岩 和变含英角斑岩等
矿体产状	脉状、透镜状	似层状、脉状、 透镜状	细脉状	层状、似层状 脉状、透镜状
主要矿石 矿物	自然银、银金矿、金 银矿、闪锌矿、方铅 矿、螺状硫银矿、银 黝铜矿、黄铁矿、黄 铜矿	碲银矿、自然银、 金银矿、辉铜银矿、 淡红银矿、闪锌矿、 方铅矿、黄铁矿	自然金 黄铁矿 镜铁矿 黄铜矿	重晶石、银金矿、金 银矿、方铅矿、闪锌 矿、黄铁矿、黄铜矿、 黝铜矿、银砷黝铜矿、 银黝铜矿、砷黝铜矿
主要脉石 矿物	石英、绢云母、白云 母、铁白云石、绿泥 石、钾长石、方解石	石英、滑石、透闪石、 白云母、绿泥石、黑云母	石英、绢云母、方 解石、绿泥石、绿帘 石、钠长石、白云石	石英、绢云母、钠 长石、阳起石、绿泥 石、绿帘石、方解石
元素组合	Au、Ag、Pb、Zn、Cu (As、Sb、Bi、Mo、Cd)	Au、Ag、Te(Pb、 Zn、Cu、Sb、Mo)	Au	Au、Ag、Pb、Zn、 Ba(Cu、As)
围岩蚀变	硅化、绢(白)云 母化、铁白云石化、 黄铁矿化、绿泥石化	硅化、滑石化、透 闪石化、黄铁矿化、 绿泥石化	硅化、黄铁矿 化、碳酸盐化、绿 泥石化、绿帘石化	硅化、黄铁矿化、绢 云母化、重晶石化、碳 酸盐化、绿泥石化
地层	50	45	>10	55~65
Ag/Au 矿体	100	58	>10	12~52
规模	大型	中 小 型	小型	中型
典型矿例	银洞沟	许家坡	白岩沟	东沟坝

区内中上元古界变质程度较低, 仅达绿片岩相, 其中武当山地区的变质程度可至高绿片岩相, 而其他地区仅达低绿片岩相。

矿产资源在区内较丰富, 除金银矿床外, 还有 Hg、Sb、Fe、Cu、Co、Ni 及非金属矿产产出。本区系一重要的金银多金属矿化带, 中上元古界中有多处金银矿床(点)。根据矿床的矿化元素组合, 结合矿物组合, 可划分为四种矿床类型。(表1)。其中 Au-Ag-Pb-Zn 型同 Au-Ag-Te 型矿床有许多相似之处, 含金石英脉型矿床则因规模小, 研究程度较低。

2 中上元古界含金银性评价

研究工作者早就注意到许多重要的金矿床产在特定的地层中, 并将这些地层视为金的矿

源层^[2,3]。但随着测试技术的提高及认识水平的深入, 发现过去所确立的矿源层中金(银)含量并不高, 因而对金的层控性提出了质疑^[4]。这主要是由于以往测试技术的落后及地壳金丰度值过高, 含金性评价中仅考虑地质体中金的丰度高低所造成的^[5, 6]。

从表1可以看出区内产于中上元古界中的金银矿床具有明显的差异, 东端(武当山地区)金银多金属矿化强, 储量中到大型; 西端矿化密集, 矿点多, 以 Au-Ag-黄铁矿-重晶石型为主, 储量中到小型; 而中部安康地区, 至今仍未发现有远景的矿化点。查明不同地区矿化类型及矿化强度间的差异及其引起这些差异的内在因素, 对推动本区金银勘查具有战略性的指导意义, 要查明这些差异必须开展系统的地层含金银性评价。为此, 分别测定了中上

表2 中上元古界中金银丰度(ppb)、 X_g/X_a 、分布型式、易释放金银比例及元素组合

地层	武 当 山 地 区					安 康 地 区		勉 略 地 区		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Au	X _a	0.84	1.05	1.17	0.73	0.59	1.08	0.95	0.80	0.85
	X _g	0.73	0.76	0.76	0.52	0.54	0.90	0.81	0.70	0.80
	N*	59	73	65	46	33	68	77	29	13
	X _g /X _a	0.87	0.72	0.66	0.71	0.92	0.83	0.85	0.88	0.91
Ag	X _a	10	47	53	26	/	<10	<10	50	29
	X _g	/	40	34	24	/	(37)* *	(49)	40	26
	N	93	58	68	73	/	68~490	40~200	29	12
	X _g /X _a	/	0.85	0.64	0.92	/	(32)	(5)	0.80	0.90
易释放 Au、 Ag 比例	低	高	高	低	低	高	低	高	低	
金银分 布型式	金偏态- 一对数 正态分布	金多峰偏 态-对数 多峰偏态; 银多峰偏 态-对数 正态分布	金多峰偏 态-对数 多峰偏态; 银多峰偏 态-对数 正态分布	金单调递 减偏态对 数单调递 减偏态; 银 偏态-对 数偏态。	金偏态- 一对数 正态分布	金多峰偏 态, 对数多 峰偏态; 银 多峰偏态 分布	金偏态- 对数正态 分布; 银 偏态分布	金单调递 减偏态, 对 数多峰偏 态; 银多峰 偏态, 对数 正态分布	金偏态- 对数单调 递减偏态, 银单调递 减偏态及 对数单调递 减偏态分布	
金银元素 组 合	Au, Sb	Au, Ag, F Sb, Hg, Bi Cu, SiO ₂	Au, Ag, Bi	Ag, Cu	/	Au, Ba, Ag Bi, Cu, Zn Cr, As, V	As, Ag Pb	Au, Ni, Cr, P, Mg	Au, Cu, Li Al, Ca, Sr	
金银矿化	Au 小型	Au, Ag 中型	Au, Ag 大型	无	无	不详	不详	Au, Ag 中小型	无	

1—武当山地区耀岭河群; 2—武当山群杨坪组; 3—武当山群挡鱼河组上亚组; 4—武当山群挡鱼河组下亚组; 5—武当山群楼台组; 6—安康地区耀岭河群; 7—郧西群; 8—碧口群酸性火山岩; 9—碧口群基性火山岩; * N—样品数, * 括号内数字为样品数

元古界各地层单元中金银的丰度, 计算了金银的几何平均值 X_g 、算术平均值 X_a 和 X_g/X_a ; 通过含量直方图剖析了金银的分布型式; 根据野外调查及室内薄片的鉴定初步确定了各地层中易释放金银(同硫化物、有机质有关的金银及吸附态金银)的比例, 利用统计分析确立了各地层中金银所形成的元素组合(表2)。

从表2可以看出: (1) 虽然各地层中金银丰度相对于其克拉克值(黎彤等, 1990)均偏低。但有金银矿床产出的杨坪组和挡鱼河组上亚组具有相对较高的金银丰度, 较低的 X_g/X_a , 金为多峰态偏分布, 银为对数正态分布, 有明显标志(含硫、碳质)佐证地层中易释放金银比例较高, 地层中元素组合与区域矿化元素组合一致。而仅有弱金矿化的耀岭河群和无金银矿化产出的楼台组、挡鱼河组下亚

组则金银丰度低, X_g/X_a 较大, 易释放金银比例较低, 金具有偏态-对数正态分布, 银具偏态-对数偏态分布, 金银难以形成特定的元素组合。明显有别于有金银矿床产出的地层。

(2) 碧口群酸性火山岩相对基性火山岩具有较高的金银丰度, 较低的 X_g/X_a , 较高的易释放金银比例, 金多峰偏态分布, 银对数正态分布。显示出为有利金银矿化产出的地层。(3) 虽然在安康地区耀岭河群中至今没有发现重要的金银矿化, 但它具有同有金银矿化产出的地层相类似的特征, 是今后找矿工作中应予以重视的地层。由此地层含金银性评价的地球化学准则可概括为: 相对较高的金银丰度和易释放金银比例; 较低的 X_g/X_a ; 金多峰偏态-对数多峰偏态, 银多峰偏态-对数正态分布; 金银形成特定的同区域矿化元素组合一致的元素组合^[1,5,6]。

表3 中上元古界中金银矿床成矿物理化学条件参数

矿床类型	Au-Ag-Pb-Zn 型	Au-Ag-Te 型	Au-Ag-Pb-Zn-黄铁矿-重晶石型
爆裂法	290~330 ℃	220~320 ℃	124~312 ℃
均一法	150~320 ℃	135~230 ℃	98~325 ℃
同位素温度计			116~206 ℃
成矿温度*	160~380 ℃	175~290 ℃	176~263 ℃
成矿压力(Pa)	$2 \times 10^7 \sim 15 \times 10^7$	$5 \times 10^7 \sim 7 \times 10^7$	$5 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7$
盐度(Wt.-%, NaCl)	9.3~12.1	4.9~8.1	4.2~6.6
密度(g/cm ³)	0.85~0.98		0.85~0.94
pH	$p_n^H \pm 1^{**}$	$p_n^H \pm 1^{**}$	4.7~6.0
氧逸度 f_{O_2} (Pa)	$10^{-25} \sim 10^{-36}$	$10^{-36} \sim 10^{-42}$	$10^{-26} \sim 10^{-32}$
硫逸度 f_{S_2} (Pa)	$10^{-7.0} \sim 10^{-11.5}$	$10^{-8.0} \sim 10^{-10.0}$	$10^{-6.56} \sim 10^{-10.70}$
成矿流体中主要阳离子、阴离子及气体成份	$Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, HCO_3^-, HS^-(S^{2-}), Cl^-, F^-, CO_2, CO$	$Mg^{2+}, Na^+, K^+, Ca^{2+}, HCO_3^-, HS^-(S^{2-}), Cl^-, F^-, CO_2, CO, CH_4$	$Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, HCO_3^-, HS^-, SO_4^{2-}, CO_2, CO, CH_4$
以 Cl^- 为配体的金的配合物的形式及作用和总 Cl^- 配合物溶解度(m)	$AuCl_2^-, AuCl_4^-$ $m_{AuCl_2^-} > m_{AuCl_4^-}$ $\sum m_{Au}: 10^{-9.16} - 10^{-14.86} m$	$AuCl_2^-, AuCl_4^-$ $m_{AuCl_2^-} > m_{AuCl_4^-}$	$AuCl_2^-, AuCl_4^-$ $m_{AuCl_2^-} > m_{AuCl_4^-}$ $\sum m_{Au}: 10^{-9.96} - 10^{-13.01} m$
以硫为配体的金的配合物形式、作用及总硫配合物溶解度	$AuS^-, Au_2S(HS)_2^{2-}, Au(HS)_2^-$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{AuS^-}$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{Au_2S(HS)_2^{2-}}$ $\sum m_{Au}: 10^{-4.11} - 10^{-5.93} m$	$Au(HS)_2^-, Au_2S(HS)_2^{2-}$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{AuS^-}$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{Au_2S(HS)_2^{2-}}$ FS	$AuS^-, Au_2S(HS)_2^{2-}, Au(HS)_2^-$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{AuS^-}$ $m_{Au(HS)_2^-} > m_{Au_2S(HS)_2^{2-}}$ $\sum m_{Au}: 10^{-4.74} - 10^{-5.93} m$
金的其它的可能迁移形成	以 CO_2, HCO_3^- 为配体的配合物	以 $Te^{2-}, HTe^-, CO_2, HCO_3^-$ 为配体的配合物	以 $SO_4^{2-}, HSO_4^-, CO_2, HCO_3^-$ 为配体的配合物

* 已经压力校正 ** 成矿温度下中性水 pH 值

3 中上元古界中金银矿床成矿物理化学条件

为查明各类金银矿床的成矿物理化学条件, 笔者系统地进行了流体包裹体地球化学、矿物学、同位素地球化学研究和热力学计算。根据所获测试数据, 利用有关参数及图解、反应方程式等^[7-11,14], 获得了除白岩沟金矿以外的三类金银矿床的成矿物理化学条件 (表3): 矿床成矿温度的变化范围都较宽, 这是由于各类矿床皆具多阶段矿化造成的。银洞沟 Au-Ag-Pb-Zn 型矿床金银沉淀主要发生在 160~180℃ 之间。东沟坝 Au-Ag-Pb-Zn-黄铁矿-重晶石型矿床主要成矿温度 176~263℃。许家坡 Au-Ag-Te 型矿床主矿化阶段的温度为 175~218℃, 成矿压力变化于 $2 \times 10^7 \sim 15 \times 10^7 \text{ Pa}$ 之间, 属于中低压条件下成矿。成矿流体的盐度除银洞沟早期成矿溶液偏高 (9.3~12.1%, wt-%, NaCl) 外, 通常变化于 4.0~8.0 (wt-%, NaCl) 之间。各类矿床成矿流体的 pH 值的变化范围均不大, 一般不超过成矿温度下中性 pH 值 (p_n^H) 左右 1 个单位 ($p_{n-1}^H \sim p_{n+1}^H$), 且从早到晚有从弱酸性向弱碱性演化之趋势^{[11][12~13]}。各类矿床的硫逸度基本上接近, 氧逸度以东沟坝矿床略高, 这同其出现硫酸盐矿物 (重晶石) 是吻合的。成矿流体中阴离子大体相同, 而主要阳离子则相差显著。例如, 银洞沟以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, Na^+ 、 K^+ 次之, 许家坡以 Mg^{2+} 、 Na^+ 为主, K^+ 、 Ca^{2+} 次之, 而东沟坝以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主, K^+ 、 Mg^{2+} 次之。相应矿床围岩蚀变, 除硅化外, 银洞沟以铁白云石化为主, 许家坡以滑石化、透闪石化为主, 东沟坝以黄铁绢英岩化为主。从表 3 还可以看出: 在以 Cl^- 为配体的金的配合物中, Au 的溶解度 AuCl_2^- 比 AuCl_4^- 大得多, 说明成矿流体中 Au 的迁移形式 AuCl_2^- 比 AuCl_4^- 重要得多。在以 $\text{HS}^- (\text{S}^{2-})$ 为配体的金的配合物中, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 比之 AuS^- 、 $\text{Au}_2\text{S}(\text{HS})_2^{2-}$ 重要得多。而以 $\text{HS}^- (\text{S}^{2-})$ 为配体的金的总溶

解度高出以 Cl^- 为配体的金的溶解度约 10^5 , 这表明在成矿流体中金主要以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 形式迁移。考虑到金银配合物形式迁移。基于许家坡和东沟坝矿床中分别出现碲银矿和重晶石考虑, 也不排除以 Te^{2-} 、 HTe^- 为配体和在高 f_{O_2} 情况下, 以 HSO_4^- 、 SO_4^{2-} 为配体迁移金银的可能性。

4 中上元古界中金银矿床稳定同位素地球化学研究

为详细研究区内中上元古界中金银矿床的成因及成矿机制, 笔者对三类主要金银矿床的同位素组成进行了全面探讨。图 2 给出了各类矿床的硫同位素组成, 其中银洞沟矿床的 $\delta^{34}\text{S}$

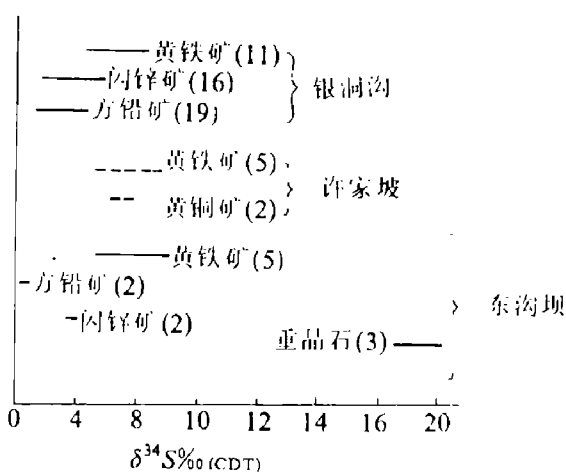


图 2 各类金银矿床的硫同位素组成

资料来源: 1—本文; 2—刘丛强 (1984);

3—成都地质学院等 (1987); 4—鄂西北

地质矿产调查所 (1987); 括号内的数字为样品数

$\text{S} \text{‰ (CDT)}$ 变化范围: 黄铁矿为 4.2~9.1, 方铅矿为 0.9~4.6, 闪锌矿为 1.1~5.6。总体看来, 其变化范围较窄, 大多集中在 4~6 之间。利用方铅矿和闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$, 采取高温平衡外推法 (Pinckney O M, 1972) 求得成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 为 2.5‰, 反映幔源硫的特征。许家坡矿床的 $\delta^{34}\text{S} \text{‰ (CDT)}$: 黄铁矿为 5.3~9.1, 黄铜矿为 6.2~7.0。考虑到许家坡同银洞沟处于同一成矿带, 且成矿物理化学条件相

似, 则成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 也应大体相当, 硫的来源相同。东沟坝矿床的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}}(\text{CDT})$: 黄铁矿为 5.3~10.5, 重晶石为 16.9~20.3, 根据同位素分馏原理^[17,18], 当黄铁矿与重晶石共生时, $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 大于黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$, 小于重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$, 据此可估算出成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 约在 12~15‰之间, 明显偏离幔源硫, 系火山成因之还原硫(富 ^{32}S)同海相硫酸盐中的硫(富 ^{34}S)混合、交换而形成的, 显示硫的多来源特征。

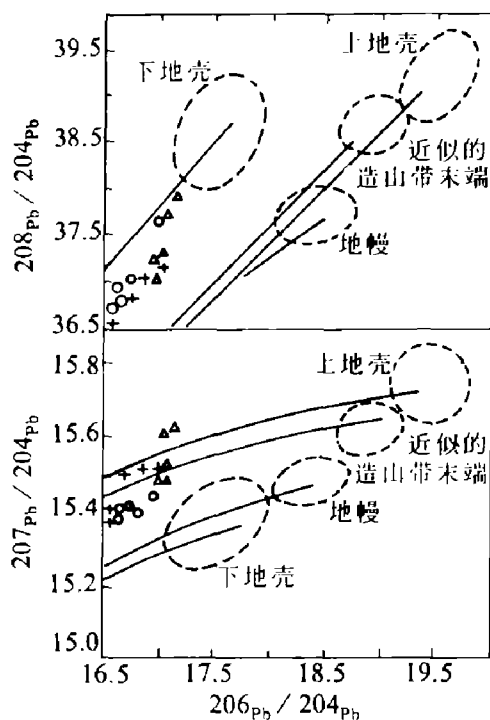


图3 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

+—银洞沟; o—许家坡; △—东沟坝

银洞沟矿床铁白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{‰}}(\text{PDB})$ 为 -1.11~-2.86, 根据成矿流体物理化学条件可推断出成矿流体的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$) 约为 -2~-7‰, 比较接近原生碳, 也同沉积碳有一定的重叠, 反映了碳的双重来源特征。

银洞沟和许家坡矿床的铅同位素组成在铅的同位素演化曲线图^[19]之 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 落在造山带和下地壳演化曲线之间; 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上主要

落在地幔和造山带曲线之间。反映了成矿物质的深源特征。而东沟坝矿床矿石铅在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上落在下地壳和造山带铅演化曲线间, 而且略偏于下地壳一侧; 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 则分布在造山带和上地壳铅演化曲线两侧, 放射性成因铅略高。说明东沟坝矿床的矿石铅具多源特征, 这同硫同位素的研究结论是一致的。

成矿流体的氢氧同位素组成研究表明: 银洞沟金银矿的成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -3~-7‰, δD 为 -40~-80‰, 既显示初始岩浆水的特征, 又同变质水的氢氧同位素组成有一定的重叠, 而从 δD 较固定和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 有一定漂移看, 不能排除有少量大气降水的加入 (图4)。许家坡 Au—Ag—Te 矿床成矿流体的 δD

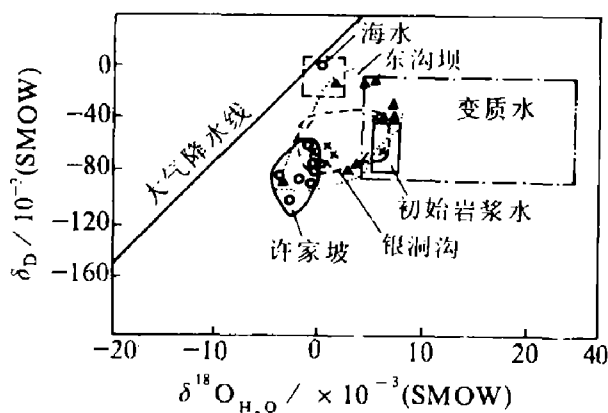


图4 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} \sim \delta\text{D}$ 图解

资料来源:1—本文;2—刘丛强(1984);3—成都地质学院等(1987,1989);4—鄂西北地质矿产调查所(1987)

为 -55~-12‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -1~-5‰, 在图4中, 落在变质水和大气降水线之间, 说明成矿流体可能是同生建造水和大气降水经变质升温而形成的, 这同矿床围岩为变泥质粉砂岩的地质事实比较吻合。东沟坝金银矿床的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 δD 变化范围较大, δD 的主要变化区间为 -20~-100‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -4~+8‰, 显示出海水、岩浆水、大气降水和变质水的多重特征, 反映该矿床成矿流体的多源性, 而成矿流体中的水较大部份来自海水和岩浆水, 这同矿床产在海相火山岩中的地质事实也是相当一致的。

5 中上元古界金银矿床成因探讨

武当山地区银洞沟矿床和许家坡矿床在同一成矿带上, 具有相类似的矿化历程。大约在1200~1300Ma, 强烈的岛弧期火山喷发-沉积作用, 在近火山机构处沉积了武当山群挡鱼河组上亚组, 在远离火山的机构处形成了杨坪组^[1]。金银等在其成岩过程中发生了初始富集, 加里东运动期间, 金银进一步富化, 强烈的印支运动期间, 予先富集在上述地层中的Au、Ag在大量富含 HS^- 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_2 、 HTe^- 的成矿流体的循环作用下被萃取出来, 在有利的构造空间沉淀而形成重要的金银矿床。这些结论的主要依据为: (1) 武当山地区金银矿床主要产在武当山群杨坪组和挡鱼河组上亚组中, 这些层位Au、Ag丰度相对较高; (2) 稳定同位素组成表明成矿物质具深源特征; (3) 银洞沟矿床容矿空间为加里东期形成的短轴背斜, 从矿体形态连续、完整看矿化较晚, 含石英脉侧的蚀变矿物绢云母K-Ar年龄为 216.88 ± 3.57 及 292 ± 4.76 Ma, 说明主矿化应在印支期^[1]; (4) 矿床强烈的围岩蚀变表明有大量成矿流体参与成矿; (5) 成矿流体因富含 H_2O 、 CO_2 、 HS^- 、 Cl^- , 故对Au、Ag的迁移起到了重要作用。综上所述可以看出银洞沟和许家坡金银矿床皆为变质中-低温热液矿床。

略阳东沟坝Au-Ag-Pb-Zn-黄铁矿-重晶石型矿床的矿化经历了从海底火山喷氧-喷液沉积矿化期到变质热液叠加改造矿化期。中晚元古代(1002~1072.8 Ma), 勉略地区强烈的海底火山喷发, 形成了碧口群第四亚群变石英角斑岩-角斑岩系列, 金银在其中得到了初始富集^[1]。富含 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的海水同火山气(H_2S 、 HCl ...)液混合进入成矿体系, 一方面火山喷发出的金银直接沉淀形成矿体; 另一方面, 成矿流体使早期形成的围岩中的金银被萃取和淋滤出来, 成矿体系中 SO_4^{2-} 同 Ba^{2+} 结合, 金银与重晶石共沉淀形成层状重晶石型矿

石。后期的变质热液叠加矿化期主要促使早期矿物的重结晶, 引起主矿体两侧大规模的绢英岩化, 形成了含Au、Ag黄铁绢英岩型矿石, 变质热液的主要作用是导致Au、Ag的再分配, 并使Au、Ag进一步富集。上述论证的主要依据为: (1) 矿体产在火山岩中, 形态为层状及似层状等, 矿石具变余凝灰质结构和变余胶状结构; (2) 矿石为重晶石、硫化物矿石, 与同生火山沉积成因的金矿床具有相似的矿物组合; (3) 矿体中硫化物颗粒细小, 有时可见胶黄铁矿, 形成温度低(表3); (4) 碧口群酸性火山岩为有利金银矿化的地层; (5) 矿石矿物的重结晶、揉皱、压碎结构, 说明后期变质作用对矿体进行了改造; (6) 大面积的黄铁绢英岩化证明后期矿体遭受了变质热液的影响; (7) 稳定同位素组成表明成矿物质和成矿流体具多来源特征。

因而东沟坝Au-Ag-Pb-Zn-黄铁矿-重晶石型矿床为受变质同生火山沉积型金银-多金属矿床。

承蒙张本仁教授、马振东副教授指导, 陕西地质二队、陕西地质七队、鄂西北地质矿产调查所大力支持, 特致谢忱!

参考文献

- 1 汪东波. 南秦岭金银成矿带地球化学, 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- 2 涂光炽等. 中国层控矿床地球化学, 第一卷. 北京: 科学出版社, 1984.
- 3 刘英俊等. 地球化学, 1987, (1).
- 4 汪东波. 桂林冶金地质学院学报, 1989, (3).
- 5 汪东波. 矿物岩石, 1991, (3).
- 6 汪东波. 矿产与勘查, 1991, (6).
- 7 何知礼. 包体矿物学. 北京: 地质出版社, 1982.
- 8 徐文忻等. 矿产地质研究所学报, 1985, (1).
- 9 林传仙等. 矿物及有关化合物热力学数据手册. 北京: 科学出版社, 1985.
- 10 Helgeson H. C et al. Econ. Geol., 1968, 63: 622~635.

(下转 P24)

参考文献

- 1 Hanna H S and Somasundaran P. In: Fuerstenau M C ed. Flotation—A M Gaudin Memorial Volume, Vol. 1, N. Y.: AIME, 197—272.
- 2 Lawver J E, Weigel R L, Snow R E and Huang C L. In: Proceedings of XIVth Int. Miner. Process. Congress, Session IV—Flotation, Paper IV—20, Toronto.
- 3 Moudgil B M and Somasundaran P. In: Somasundaran P ed. Advances in Mineral Processing Colorado: SME / AIME, 1986, 426—41.
- 4 Somasundaran P, Xiao L P and Wang D Z. SME preprint 90—188, 1990 Annual Meeting of AIME / SME, Denver, Colorado: 1990 Mineral & Metall. Process., AIME / SME, in print to be published in 1991.
- 5 Somasundaran P, Wang D Z and Xiao L P Solution Chemistry of Reagents in Mineral Processing, Elsevier Science Publishers B. V., to be published 1991.
- 6 Wang D Z and Hu Y H. Solution Chemistry of Flotation, Changsha, Hunan Scientific Press, 1989.
- 7 Somasundaran P, Amankonah J O and Ananthapadmanabhan K P., Colloids and Surfaces, 1985, 15, 309—33.
- 8 Somasundaran P and Ananthapadmanabhan K P, In: Somasundaran P ed., Advances in Mineral Processing, SME / AIME, Colorado, 1986, 137—53.
- 9 Xiao L P, Viswanathan K V and Somasundaran P. In: Li S *et al* eds, Extractive Metallurgy and Material Sci.—Proceed. Inter. Sym, Changsha, China, 1987, 110—20.
- 10 Somasundaran P. Int. J. Miner. Process., 1976, 3, 35—40.
- 11 Ananthapadmanabhan K P and Somasundaran P. In: Yarar B ed, Interfacial Phenomena in Mineral Processing, Engineering Foundation, N Y., 1980, 207—27.
- 12 Ananthapadmanabhan K P and Somasundaran P., J. Colloid Interface Sci. 1988, 22(1): 104—9.
- 13 Ananthapadmanabhan K P. D. E. S. Thesis, Columbia University. 1980.
- 14 Ananthapadmanabhan K P, Somasundaran P and Healy T. W. Trans. SME / AIME, 1980, 266, 2003—9.
- 15 Xiao L P, Viswanathan K V and Somasundaran. 1988, SME preprint 88—189, 1988 Annual Meeting of AIME / SME, Phoenix, Arizona Mineral & Metall. Process., AIME / SME, May 1989, 100—3.
- 16 Amankonah J O and Somasundaran P. Colloids and Surfaces, 1985, 15: 335—353.
- 17 Xiao L P *et al.* to be published on J. Colloid Interface Sci.
- 18 Xiao L P *et al.*, In: Proceed. 17th Inter. Mineral Process. Congress. 1991.
- 19 Xiao L P. D. Eng. Sc. Thesis, Henry Krumb School of Mines, Columbia University; Uniform Press, Michigan, 1990.
- 20 Leja J. Surface Chemistry of Froth Flotation, Plenum Press, N. Y., 1982, 295.
- 21 Somasundaran P and Hu Y H. In: Mishra ed, Adsorption and Surface Chemistry of Hydroxyapatite, Plenum, N. Y., 1984, 129—49.
- 22 Somasundaran P. *et al.*, Soc. Petroleum Eng. J., 1984, Dec: 667—74.

(上接 P7)

- 11 Seward T M. In: Foster R P Ed, Gold' 82, the geology, geochemistry and genesis of gold deposits, Rotterdam, Balkman, 1984.
- 12 Barnes H L. In: Barnes H L Ed, Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd edition. N. Y.: John Wiley Sons, 1979.
- 13 Rose A *et al.* In: Barnes H. L, Ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd edition. N. Y.: John Wiley Sons, 1979.
- 14 Barton M D. Econ. Geol., 1980, 75: 303—316.
- 15 Henly R W. Chem. Geol., 1973, (11): 73—87.
- 16 涂光炽等. 中国层控矿床地球化学, 第三卷. 北京: 科学出版社, 1988.
- 17 Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry, 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- 18 Ohmoto H. Econ. Geol., 1972, 67: 551—579.
- 19 Zartman R E, Haines S M. Geochimica et Cosmochimica Acta., 1988, 62: 1327—1339.
- 20 汪东波等. 地质找矿论丛, 1991, 6(1).