

湘西层控金矿床成因机制的研究^①

牛贺才 马东升

(南京大学地球科学系, 南京)

内容提要: 流体包裹体的研究表明, 湘西层控金矿床为中低温热液矿床, 矿床在弱还原、弱碱性的成矿流体中形成, 成矿流体为变质水与建造水混合而成。在流体中金主要以 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 络离子形式运移, 流体温度及pH值的改变是导致金沉淀的主要因素。流体包裹体的研究还揭示, 成矿能量主要由雪峰造山作用提供。元素地球化学的研究则证实, 湘西元古界是典型的Au-Sb-W含矿建造, 它为湘西层控金矿床的形成提供了物质基础。本文的研究显示, 湘西层控金矿床的成矿作用是中低温开放体系水、岩反应过程。

主题词: 层控金矿床 成矿流体 变质水 建造水 Au-Sb-W含矿建造

湘西地区元古代地层中分布着以西冲、沃溪、漠滨等为代表的层控金矿床, 它们占湖南金矿床(点)的72%。矿床产在切层断裂或层间剥离带中, 它与构造扩容空间有密切的联系。矿体两侧的围岩普遍发育硅化、绢云母化及碳酸盐化等中低温热液蚀变。矿石为石英-黄铁矿-自然金-碳酸盐、石英-辉锑矿-自然金及石英-白钨矿-辉锑矿-自然金-碳酸盐等中低温矿物组合。围岩蚀变及矿石矿物组合显示, 这类矿床为中低温热液矿床^[1]。作者通过成矿物理化学条件、成矿流体及成矿物质来源的研究, 探讨了湘西层控金矿床的成因机制。

一、湘西层控金矿床形成的物理化学条件

通过对湘西元古界典型层控金矿床中流体包裹体的研究, 对该类矿床形成的物理化学条件有了比较全面的认识。

1. 矿床形成的温度: 在法国 Chaixmecca 冷热两用台上对具有代表性的样品进行了包裹体均匀化温度测定, 测定值的统计结果如表1所示。

湘西层控金矿床流体包裹体均匀化温度为325—99℃, 变化范围较宽, 但绝大多数落在220—160℃的区间内, 为中低温热液矿床。

矿化由早期→晚期, 成矿温度不断下降, 矿石矿物组合也随之发生相应的变化(表1)。不难推断, 温度是控制不同矿物沉淀的主要因素。

流体包裹体均匀化温度测定表明, 层控金矿床的成矿温度东安构造层(冷家溪群)高于雪峰构造层; 而在雪峰构造层中, 位于下部马底驿组中的金矿形成温度又高于其上覆五强溪组(表1)。可见, 随着赋矿层位的增高, 矿床的成矿温度逐渐下降, 这种变化与地温的纵向分布规律相吻合。成矿流体的化学成分及氢、氧同位素的研究表明, 湘西层控金矿床的成矿

① 本课题由中国科学院矿床地球化学开放实验室、国家自然科学基金委员会联合资助

表 1 湘西层控金矿床形成的物理化学参数

Table 1. Physical-chemical parameters for the formation of stratabound gold deposits in west Hunan

矿床	赋矿地层	有用元素	成矿阶段	测定矿物	样数(个)	pH _t	pH _t -pH ₀	温度(°C)	盐度(%)	流体密度(g/cm ³)	形成压力(10 ⁵ Pa)
益阳南郊	冷家溪群	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英	4	8.30	2.8	325—286 (300)	6.9—6.0 (6.5)	0.80—0.77 (0.78)	200—400 (300)
			石英-细粒黄铁矿-自然金	石英	5	6.42	0.8	235—208 (220)	8.6—6.3 (7.5)	0.95—0.87 (0.91)	200
			石英-碳酸盐	石英	1	3.40	0.6	170	8.5	0.94	200
西冲	冷家溪群	Au-Sb	石英-白钨矿	石英	1	8.41	2.9	304	6.1	0.72	—
			石英-硫化物-自然金	石英	5	7.06	1.6	252—201 (220)	8.5—6.7 (7.5)	0.91—0.84 (0.88)	—
			石英-碳酸盐	石英	3	—	—	170—134 (150)	—	—	—
沃溪	板溪群 马底驿组	Au-Sb-W	石英-白钨矿	石英	1	8.11	2.1	264	5.7	0.83	280
			石英-硫化物-自然金	石英	10	6.42	0.7	210—165 (195)	8.2—4.3 (7.0)	0.94—0.91 (0.93)	200
			石英-碳酸盐	石英	2	6.01	-0.1	128—99 (115)	7.5	0.99	200
漠滨	板溪群 五强溪组	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英	5	3.56	0.9	226—191 (203)	9.2—6.3 (7.5)	0.96—0.91 (0.92)	200—350 (250)
			石英-硫化物-自然金	石英	7	3.40	0.6	180—164 (174)	9.3—6.4 (8.3)	0.97—0.92 (0.96)	200—300 (220)

表中数据均由笔者测定、计算 1990；表中括号内为统计平均值；pH_t 为 t 温度下成矿流体的 pH 值，pH₀ 为 t 温度下中性溶液的 pH 值

流体以建造水为主。在湘西地区板溪群最大厚度约为 3.8 km，按正常的地温梯度计算，板溪群中建造水的最高温度仅达 80℃，远远低于赋存于其中的层控金矿床的成矿流体温度，这说明在湘西层控金矿床形成时，该地区的地温梯度很大。鉴于在多数金矿床附近既无大规模的侵入岩，也缺乏具有隐伏岩体的地球物理证据，同时考虑到该类矿床的形成时代与雪峰造山作用有关^[2]，笔者认为湘西层控金矿床的成矿能量主要由雪峰造山作用提供。

2. 成矿流体的盐度及 pH 值：湘西层控金矿床成矿流体的盐度在 4.5—9.2% 范围内变化，大多数集中在 6—8%（表1），它高于典型变质水的盐度^①，与地下热水的盐度相近似^[3]。在湘西层控金矿床中，成矿由早期→晚期，成矿流体的盐度逐渐增大，其差值最大可达 2%，而不同矿床成矿流体的盐度则没有明显差别（表1）。

根据成矿流体的温度及盐度，在 NaCl 溶液密度表^[4]上求出了不同矿床，不同矿化阶段成矿流体的密度，它介于 0.72—0.99 g/cm³ 之间，属中等密度。成矿作用由早期→晚期，

① 罗伯茨，R. G.，1988，太古宙金矿床。国外地质，第 2 期

成矿流体的密度逐渐增大(表1)。

利用包裹体液相、气相成分可以比较准确地计算成矿流体的 pH 值,它解决了成矿流体 pH 值无法直接测定的难题。在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 体系中,流体的 pH 值主要受 CO_2 分压(p_{CO_2})和 NaCl 浓度的控制。上述研究表明,湘西层控金矿床成矿流体的盐度低于 10%,在这种情况下,成矿流体的 pH 值主要由 H_2CO_3 的一级离解常数 K_2 和碳酸根离子总浓度 ΣHCO_3^- 确定,即



$$\text{pH} = \text{p}k_2 + \lg(\Sigma\text{HCO}_3^- / k_1 p_{\text{CO}_2})$$

其中 k_1 、 k_2 分别为反应(1)、(2)在不同温度下的反应平衡常数。笔者利用已有的物理化学参数^[11]及后文所列的包裹体气相、液相成分计算了湘西层控金矿床成矿流体的 pH 值。

计算表明,湘西层控金矿床是在弱碱性热液中形成的,随着矿化作用的持续,成矿流体的碱性程度逐渐减弱(表1)。

3. 成矿流体的氧化-还原性质:流体包裹体中微量气体的含量不但反映了成矿流体的化学组成,而且可以揭示成矿流体的氧化-还原性质。在湘西层控金矿床中,成矿流体的气相成分以 CO 、 CO_2 、 CH_4 为主,其中 CO 含量最高(表2),说明其成矿热液弱还原性流体。成

表 2 湘西层控金矿床流体包裹体的气相成分

Table 2. Gas composition of fluid inclusions in stratabound gold deposits of west Hunan

矿床	赋矿地层	有用元素	成矿阶段	测定矿物	样数(个)	CH_4 (10^{-6})	CO (10^{-6})	CO_2 (10^{-6})	H_2O (10^{-6})	$\frac{(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})}{(\text{CH}_4 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})}$
益阳南郊	冷家溪群	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英	3	0.001	5.09	4.15	518.6	0.990
			石英-硫化物-自然金	石英	3	0.001	8.17	4.88	524.4	0.985
			石英-碳酸盐	石英	3	0.13	6.76	4.18	550.3	0.983
西冲	冷家溪群	Au-Sb	石英-白钨矿	石英	2	0.26	4.30	4.06	668.6	0.993
			石英-硫化物-自然金	石英	3	0.21	9.44	2.98	689.9	0.986
沃溪	板溪群马底驿组	Au-Sb-W	石英-白钨矿	石英	3	0.001	2.73	6.59	678.9	0.996
			石英-硫化物-自然金	石英	5	0.001	8.60	6.95	793.1	0.989
			石英-碳酸盐	石英	2	0.001	9.63	7.70	624.0	0.985
溁滨	板溪群五强溪组	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英	3	0.28	10.10	6.89	708.6	0.985
			石英-硫化物-自然金	石英	5	0.27	10.32	6.92	674.0	0.983

由南京大学地球科学系中心实验室分析 1989

矿由早期→晚期, $(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4)$ 值逐渐减少, 这反映了成矿过程中流体的还原程度逐渐增大。

4. 矿床形成的压力: 根据流体包裹体均匀化温度、成矿流体盐度及密度, 在均匀化温度、盐度、密度与压力关系图(图1)上求出了湘西层控金矿床的形成压力(表1)。

湘西层控金矿床形成压力在 $400 \times 10^5 - 200 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的范围内变化, 为低压矿床, 且随着时间的推移, 成矿压力不断下降。压力估算表明, 湘西层控金矿床的矿化明显受构造控制, 它的储矿构造应为构造扩容空间。事实上, 该类矿床的定位确实受到构造的制约, 矿体均产在切层断裂或层间剥离带中。

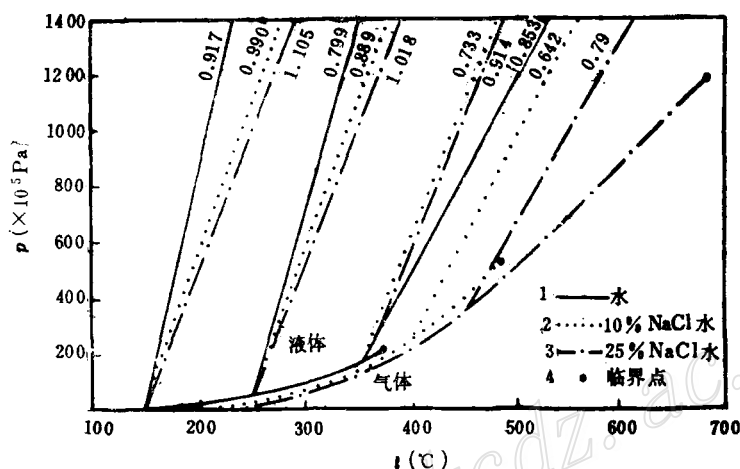


图1 流体包裹体均匀化温度、盐度、密度与压力关系图

(据 E. Roedder, 1985)

Fig. 1. Diagram showing relationships of pressure to homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions.

综上所述, 湘西层控金矿床成矿流体为中等盐度的中低温热液, 矿床在弱碱性、弱还原性的介质和低压环境中形成, 而成矿能量则主要由雪峰造山作用提供。

二、湘西层控金矿床成矿流体的来源

不同来源的成矿流体不仅在氢、氧同位素组成上有明显的差别, 而且它们的化学组成也存在着一系列的差异, 详细研究流体的氢、氧同位素及其化学组分特征, 可以了解其来源。

1. 成矿流体的化学组成特征: 表3为不同矿床、不同矿化阶段流体包裹体的液相成分, 它代表了成矿流体的化学组成。必须指出, 表中的 SO_4^{2-} 仅是成矿流体中总硫的分析形式, 在湘西层控金矿床形成物理化学条件下, 它反映了成矿流体中 HS^- 的含量(图2)。

益阳南郊金矿: 早期石英-粗粒黄铁矿-毒砂及中期石英-细粒黄铁矿-自然金阶段成矿流体的阴离子 $\text{Cl}^- > \text{F}^-$, 且以 HCO_3^- 为主, 阳离子则以 K^+ 为主, 这与变质水的化学组成特征相类似^①, 而晚期的石英-碳酸盐阶段成矿流体阴离子 $\text{Cl}^- < \text{F}^-$, 且以卤素离子为主,

① 罗伯茨 R. G., 1988, 太古代金矿床。国外地质, 第2期

表 3 湘西层控金矿床流体包裹体的液相成分 (mol)

Table 3. Liquid composition of fluid inclusions in stratabound deposits of west Hunan

矿床	赋矿地层	有用元素	成矿阶段	测定矿物	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
益阳 南矿	冷水溪群	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英 (3)	0.35	0.23	0.04	0.03	0.02	0.71	0.04	0.05	0.11
			石英-细粒黄铁矿-自然金	石英 (3)	0.02	0.14	0.24	0.03	0.001	0.59	0.05	0.14	0.38
			石英-碳酸盐	石英 (3)	0.14	0.11	0.25	0.03	0.01	0.35	0.36	0.10	0.43
西冲	冷水溪群	Au-Sb	石英-白钨矿	石英 (2)	0.02	0.09	0.12	0.08	0.01	0.44	0.17	0.15	0.13
			石英-硫化物-自然金	石英 (3)	0.04	0.15	0.35	0.25	0.02	0.52	0.25	0.16	0.22
沃溪	板溪群 冯底驿组	Au-Sb-W	石英-白钨矿	石英 (3)	0.44	2.08	0.27	0.001	0.001	8.13	1.42	0.67	1.49
			石英-硫化物-自然金	石英 (5)	0.08	0.46	1.75	0.11	0.11	0.61	0.24	0.19	1.50
			石英-碳酸盐	石英 (2)	0.11	0.60	2.44	0.01	0.01	0.44	0.33	0.06	2.58
漠溪	板溪群 三强溪组	Au	石英-粗粒黄铁矿-毒砂	石英 (3)	0.07	0.30	0.67	0.15	0.15	0.78	0.13	0.24	0.55
			石英-细粒黄铁矿-自然金	石英 (5)	0.11	0.27	0.91	0.03	0.03	0.70	0.16	0.16	0.52

样品由南京大学地球科学系中心实验室分析, 1989; 括号中数字为样品数

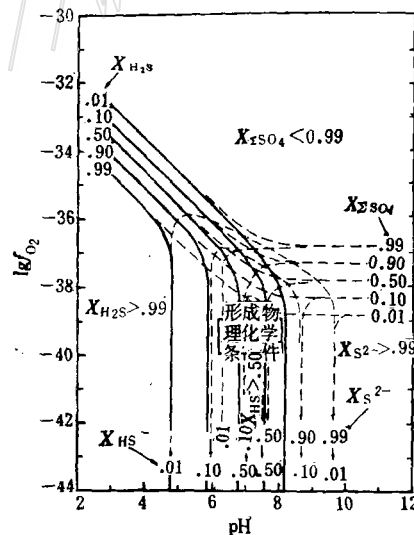


图 2 水溶含硫原子团对总硫的摩尔数
(据 H. Ohmoto, 1972)

Fig. 2. Mole fractions of aqueous sulfur species relative to sulfur content.

阳离子 Ca^{2+} 的含量高于 K^+ 、 Na^+ ，与地下热水的化学组成相近似^[3]。

成矿流体化学成分分析表明，益阳南郊金矿成矿流体具有明显的混合特征，它由低盐度的变质水与中等盐度的地下热水混合而成，早期及主矿化期以变质水为主，晚期则以地下热水为主。显然，随着矿化作用的持续，地下热水所占比例逐渐增大，而这种变化则是导致成矿流体盐度逐渐增大的主要原因。

沃溪金矿：早期的石英-白钨矿阶段成矿流体阴离子以 HCO_3^- 为主， $\text{Cl}^- > \text{F}^-$ ，阳离子 K^+ 的含量明显高于 Ca^{2+} 、 Na^+ 的含量，显示出变质水的特征。中晚期的成矿流体中阴离子相对丰度为 $\text{HS}^- > \text{HCO}_3^- > (\text{Cl}^- + \text{F}^-)$ ，且 $\text{F}^- > \text{Cl}^-$ ，阳离子以 Ca^{2+} 为主，显示出地下热水的特征^[3]。与益阳南郊金矿一样，随着矿化作用的持续，沃溪金矿成矿流体中地下热水所占的比例逐渐增大。

上述研究表明，地下热水参与了成矿作用，且中晚期的成矿流体以地下水为主。但必须指出，益阳南郊金矿与沃溪金矿的地下热水来源不同，前者是以卤素为主的深部地下热水，而后者则是以 HS^- 为主的浅部地下热水^[3]。可见，随着赋矿层位的增高，参与成矿作用的地下热水来源变浅，因而可以推断，参与成矿作用的地下热水主要是建造水。

应当指出，在上述两个矿床中变质水均参与了成矿作用，但其围岩变质很浅，特别是板溪群变质程度远远低于绿片岩相，因此变质水不可能来自本层位，只能由深大断裂导流而来自深部。

漠滨与西冲金矿：在漠滨与西冲矿床成矿流体中，阴离子浓度顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{HS}^- > \text{F}^- + \text{Cl}^-$ ，且 $\text{F}^-/\text{Cl}^- > 1$ ，阳离子则以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主，显示出浅部建造水的特征^[3]。

流体包裹体液相成分分析表明，在成矿流体中，阴离子主要是 HCO_3^- 、 HS^- 和 Cl^- ，已有许多学者曾就 HS^- 、 Cl^- 对金运移能力的影响开展过专题研究^[10,12]，但关于 HCO_3^- 对金运移能力影响的论述尚不多，为此笔者利用水、岩反应研究了 HCO_3^- 对Au活化迁移能力的影响（表4）。

表4 溶液性质对水、岩反应的影响

Table 4. Effects of solution properties on water/rock reaction

实验编号	实验样品	实验温度 (°C)	实验压力 (10 ⁵ Pa)	反应溶液性质 (mol)	Au含量 ^① (10 ⁻³)	Au的淋滤率 (%)	Sb含量 ^① (10 ⁻⁶)	Sb的淋滤率 (%)	W含量 ^① (10 ⁻⁶)	W的淋滤率 (%)
N-6	马底驿组板岩	200	400	0.5 NaCl	8.1×10^{-2}	66.3	7×10^{-3}	7.9	4×10^{-3}	3.2
N-10	马底驿组板岩	200	400	0.25 NaCl	7.9×10^{-2}	64.6	8×10^{-3}	9	2×10^{-3}	1.6
N-11	马底驿组板岩	200	400	0.10 NaCl	7.5×10^{-2}	61.3	8×10^{-3}	9	2×10^{-3}	1.6
N-12	马底驿组板岩	200	400	0.25 NaHCO ₃	6.9×10^{-2}	56.4	4.5×10^{-2}	50.6	2×10^{-2}	16

① Au、Sb、W含量为反应后溶液中的含量；样品由贵阳地球化学所分析，1990

实验表明， HCO_3^- 不利于金的活化迁移，但却能使钨的淋滤率成倍地增长。显然，沃溪等金矿中早期的钨矿化应与成矿流体中富 HCO_3^- 有关。

水、岩反应的实验排除了 HCO_3^- 与Au形成稳定络离子的可能性，同时考虑到湘西层控金矿床成矿流体富硫，笔者认为在成矿过程中金应以硫氢络离子 $[\text{Au}(\text{HS}^-)_2]^-$ 的形式迁移。

H. B. Вилор 等人的研究揭示, 在低温 (小于 200°C) 条件下, 温度每下降 50°C 溶液中 $[\text{Au}(\text{HS}^-)_2]^-$ 的浓度下降一个数量级。他们的研究同时还表明, $[\text{Au}(\text{HS}^-)_2]^-$ 络离子的稳定性在流体由碱性向酸性转变过程中迅速减小^①。显然, 成矿流体温度和 pH 值的减小均是 Au 沉淀的主要因素。

2. 成矿流体氢、氧同位素特征: 为了进一步讨论成矿流体来源, 作者收集了部分矿床成矿流体氢、氧同位素资料 (表5)。

表 5 湘西层控金矿床成矿流体
氢、氧同位素特征

Table 5. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of ore-forming fluids in stratabound gold deposits of west Hunan

矿床	赋矿地层	成矿阶段	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
沃溪	板溪群	石英-白钨矿	8.1	-64 ①
			19.2	-55 ②
	马底驿组	石英-硫化物	5.2	-58 ②
			6.6	-86 ②
		自然金	6.1	-81 ①
漠滨	板溪群 五强溪组		2.64	-42 ③
			1.99	-47 ③
		石英-细粒黄	3.85	-60 ③
		铁矿-自然金	3.27	-49 ③
			3.35	-37 ③
			-0.44	-51 ③

① 据罗献林(1984); ② 据成都地院(1985); ③ 据周德忠(1989)

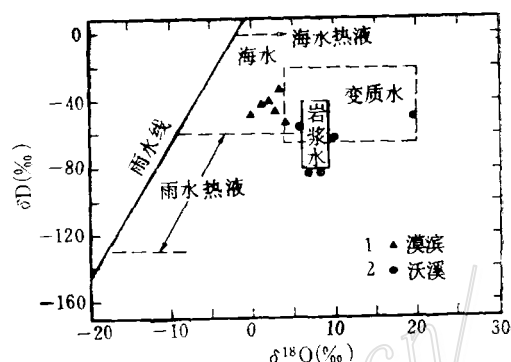


图 3 不同来源水的氢、氧同位素组成

(据 S. M. F. Sheppard, 1977)

Fig. 3. Hydrogen and oxygen isotopic composition of waters of different origins.

湘西层控金矿床的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 在 -0.44 — 19.2‰ 范围内变化, 而 δD 则在 -85 — -37‰ 区间内波动, 它们在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - δD 关系图上的投影点落在变质水与建造水的范围内 (图3)。

沃溪金矿早期的石英-白钨矿阶段成矿流体的氢、氧稳定同位素特征与变质水相类似, 而主矿化的石英-硫化物-自然金阶段的成矿流体氢、氧同位素组成则与建造水相同。这表明沃溪金矿成矿流体具有明显的混合迹象, 早期以变质水为主, 主矿化期则以建造水为主。漠滨金矿主矿化的石英-细粒黄铁矿-自然金阶段成矿流体氢、氧同位素组成与变质水有明显的差异, 与建造水的特征相近似。在沃溪、漠滨矿床中, 对矿化起主导作用的是建造水。

三、湘西层控金矿床成矿物质的来源

刘英俊^[5,6]、罗献林^[7]等人研究认为, 湘西层控金矿床的成矿物质来源于元古界含矿建

造, 作者的研究进一步证实了前人的工作。

1. 湘西元古界 Au、Sb、W 的含量: 微量元素地球化学研究表明, 湘西元古界中 Au、Sb、W 的平均含量明显高于上部大陆地壳的平均值 (表6), 它可以为矿床的形成提供必要的成矿物质。

表 6 湘西元古界微量元素平均含量

Table 6. Average contents of minor elements in Proterozoic strata of west Hunan

岩石类型	V (10 ⁻⁶)	Cr (10 ⁻⁶)	Co (10 ⁻⁶)	Ni (10 ⁻⁶)	W (10 ⁻⁶)	Sn (10 ⁻⁶)	Cu (10 ⁻⁶)	Pb (10 ⁻⁶)
五强溪粗砂岩 (20)	60.3	67.5	12.8	9.6	3.2	2.9	20	24.9
马底驿组板岩 (10)	119.8	159.2	22.3	25.5	5.2	3.5	33	25.6
冷家溪群板岩 (7)	145.5	173.9	21.7	27.7	4.5	4.2	57.5	36.9
上部大陆地壳 ^①	60	35	10	20	2.0	5.5	25	20
岩石类型	Zn (10 ⁻⁶)	Au (10 ⁻⁹)	Ag (10 ⁻⁹)	As (10 ⁻⁶)	Hg (10 ⁻⁹)	Sb (10 ⁻⁶)	Sr (10 ⁻⁶)	Ba (10 ⁻⁶)
五强溪粗砂岩 (20)	102.7	2.4	7.8	4.5	43	1.7	100	859.2
马底驿组板岩 (10)	137.1	3.4	5.0	2.3	47	2.1	45.9	441.8
冷家溪群板岩 (7)	156.5	3.6	5.0	9.5	52	2.4	27.6	409.6
上部大陆地壳 ^①	71	1.8	5.0	1.5	80	0.2	350	550

样品由华东有色金属地质勘探局 814 队分析, 1989; ^① 据 Taylor, S. R., 1985; () 括号内为样品个数

2. 湘西元古界 Au、Sb、W 的赋存状态: 湘西元古界的变形、变质特征表明, 它所遭受的改造作用很弱, 特别是板溪群变质程度远远低于绿片岩相。在这种情况下, 成矿元素的赋存状态是决定其能否活化转移的主要因素。

为了探讨 Au 在岩石中的赋存状态, 对其在马底驿组板岩各种矿物之间的分布进行了研究, 其结果如表 7 所示。板岩主要的造岩矿物为石英、长石、绢云母及粘土矿物, 重砂矿物主要是赤铁矿。Au 在赤铁矿中含量最高, 常温常压淋滤实验显示, Au 在其中主要以吸附形式存在。板岩中有 73.8% 的金赋存在粘土矿物中, 金在粘土矿物中的赋存状态应以吸附形

表 7 金在马底驿组板岩各种矿物之间的分布特征

Table 7. Distribution of gold in different minerals of Madiyi slate

人工重砂类别	粒 径 (mm)	重 量 (g)	主 要 矿 物	金含量 (10 ⁻⁹)	矿物金(岩石金) (%)
中 砂	0.074	770	大部分为红褐色石英, 有少量的赤铁矿	7.6	5.9
摇床尾矿	0.063	455	有微量的赤铁矿, 多数为长英质矿物	5.3	2.5
		76	有少量的赤铁矿, 多数为长英质矿物	6.0	0.4
	0.063—0.047	1250	有少量赤铁矿、长石及石英, 多数为粘土矿物	9.6	12.3
溜槽尾矿	0.047—0.041	9250	粘土矿物	7.8	73.8
精 砂	0.063	32	主要为赤铁矿, 有极少量的黄铁矿和铅石	154	5.1

样品由贵阳地球化学研究所分析测定, 1990

式为主。上述研究表明,金主要以吸附形式赋存于岩石中。

涂光炽等人^[8]通过电渗析实验研究,认为在湘西板溪群马底驿组板岩中至少有25%的钨是以吸附形式存在。

低温($\leq 200^{\circ}\text{C}$)水/岩反应实验显示,在低温热液作用下,马底驿组紫红色板岩中66.3%的金、50.6%的锑发生了活化转移(表4)。这说明在湘西元古界中有相当数量的Au、Sb是以易活化的状态存在。

成矿元素含量及赋存状态的研究表明,湘西元古界是一个典型的Au-Sb-W含矿建造,在为矿床形成提供成矿物质方面能起重要作用。

3. 成矿物质来源于元古界含矿建造的其他地球化学证据:区域地球化学研究揭示,在西冲—沃溪金矿密集区长达85 km、宽为15 km的区域内,冷家溪群板岩(除矿区及矿化带外)Au的含量为 2.1×10^{-9} ,板溪群马底驿组板岩为 $(1.9-1.6) \times 10^{-9}$;在漠滨金矿周围85 km²的范围内,赋矿地层五强溪组砂岩的Au含量仅为 $(0.4-1.1) \times 10^{-9}$,它们远远低于该区相关地层Au的背景值。在沃溪金矿,矿化围岩金含量(17.9×10^{-9})大于区域地层背景值(3.4×10^{-9})大于近矿围岩金含量(2.5×10^{-9})。上述研究显示,在西冲—沃溪及漠滨矿床附近存在着Au含量的低值带,它与矿化围岩及矿床一起构成了成矿元素贫化-富集的地球化学共轭体系。这种地质现象揭示了成矿物质来源于矿体周围的成矿元素贫化带,从而解决了成矿过程中物质平衡问题。

硫同位素组成被广泛地用来作为判别成矿过程中硫来源的依据。但是由于成矿物理化学条件的影响,常常使沉淀的硫化物硫同位素组成与热液总硫的同位素组成有显著差别,要正确了解成矿过程中硫的来源,必须依据成矿物理化学条件,通过硫化物的硫同位素资料推算成矿热液的总硫同位素组成^[9]。计算表明,湘西层控金矿床成矿流体总硫同位素组成与赋矿地层硫同位素组成相近似(表8),显示出成矿流体中的硫主要来自地层。

表8 湘西层控金矿床硫同位素组成特征

Table 8. Sulfur isotopic composition of stratabound gold deposits in west Hunan

矿床和地层	样品数 (个)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$ (‰)	矿床和地层	样品数 (个)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$ (‰)
漠滨金矿	56	1.36—11.40	8.06 ^①	9.10	马底驿组	2	-5.5—-6.3	-5.9 ^②	
五强溪组	2	16.20—17.20	16.70 ^②		西冲金矿	10	-14.3—-9.8	-12.8 ^①	-11.8
沃溪金矿	25	-12.50—-2.10	-4.99 ^③	-3.99	冷家溪群	1	-10.4	-10.4 ^④	

① 据罗献林(1990); ② 据罗献林(1984); ③ 据成都地院(1985); ④ 据罗献林(1988)

四、湘西层控金矿床成矿机制

在雪峰造山作用的能量驱使下,不同性质的建造水与Au-Sb-W含矿建造相互作用,使其中的Au、Sb、W发生不同程度的活化转移。富含成矿元素的中低温热液向相对低压的构造扩容带(大断裂、构造线的转折处)汇聚,并在此与数量不等的变质水混合。在构造扩容

带中由于减压、混合等因素的影响,成矿流体温度、化学组成及 pH 值等参数发生变化,导致稳定的络离子离解,使成矿元素沉淀并形成相应的 Au-Sb-W、Au-Sb 及单 Au 层控金矿。可见,湘西层控金矿床的成矿作用是中低温开放体系水/岩反应过程。实验也已证实,在开放体系中,中低温热液与湘西元古界 Au-Sb-W 含矿建造进行反应确实能使其中相当数量的 Au、Sb 和一定量的 W 发生有效的活化转移。

结 论

1. 流体包裹体的研究表明,湘西层控金矿为中低温热液矿床,矿床在弱还原、弱碱性介质中低压环境下形成,构造扩容空间对矿体的定位具有明显的控制作用。

2. 成矿流体的化学组成及氢、氧同位素特征揭示,湘西层控金矿床的成矿流体具有明显的混合迹象,它是由变质水与建造水混合而成的中等盐度的中低温热液。成矿流体化学成分的研究还表明, Au 在成矿流体中主要以 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 络离子形式运移,成矿流体温度及 pH 值等参数的改变是导致 Au 沉淀的主要原因。

3. 微量元素地球化学研究表明,湘西元古界中 Au、Sb、W 等低丰度元素的含量明显高于上部大陆地壳的平均值,具有相当数量的 Au、Sb、W 是以易活化的形式赋存于岩石中,这说明湘西元古界是典型的 Au-Sb-W 含矿建造。区域地球化学、围岩蚀变地球化学及硫同位素地球化学的研究则表明,湘西层控金矿床的成矿物质主要来自湘西元古界 Au-Sb-W 含矿建造。

4. 在雪峰造山作用的能量驱使下,不同性质的建造水与湘西元古界 Au-Sb-W 含矿建造相互作用,使其中的 Au、Sb、W 发生不同程度的活化转移。富含成矿元素的成矿流体在区域构造应力场的驱动下,向构造扩容带汇聚,并在此与数量不等的变质水混合。减压及混合作用使成矿流体的温度及 pH 值等物理化学参数发生明显的变化,导致成矿元素沉淀并形成相应的 Au-Sb-W、Au-Sb 及单 Au 层控金矿床。

刘英俊教授审阅了全文,并提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 胡受奚等 1982 矿床学(上册) 地质出版社 第125—128页
- [2] 罗献林 1989 论湖南前寒武系金矿床的形成时代 桂林冶金地质学院学报 第9卷 第1期 第29—38页
- [3] 巴恩斯 H. L. 1985 热液矿床地球化学(上册) 地质出版社 第148—179页
- [4] 李兆麟 1988 实验地球化学 地质出版社 第227—257页
- [5] 刘英俊等 1983 湘西桂东一带金矿地球化学研究 第3期 第229—240页
- [6] 刘英俊等 1991 论江南型金矿床的成矿作用地球化学 桂林冶金地质学院学报 第11卷 第1期
- [7] 罗献林等 1984 论湘西沃溪金、锑、钨矿床的成因 地质与勘探 第20卷 第7期 第1—10页
- [8] 涂光炽等 1987 中国层控矿床地球化学 第2卷 科学出版社 第61—97页
- [9] 沈渭洲等 1987 稳定同位素地质 原子能出版社 第189—243页
- [10] Seward, T. M., 1982, The transport and deposition of hydrothermal system. In: Foster, R. P. ed., Proceedings of the Symposium Gold'82, University of Zimbabwe, p. 165—181.
- [11] Булах А. Г., Куриловичев В. Г., 1985, Расчет минеральных Равновесий, Ленинград. «Недра», Ленинградское Отделение.

- [12] Баранова Н. П. и Рыженко Б. Н., 1981, Система Au-Cl-S-Na-H₂O в связи с условиями переноса и отложения золота в гидротермальном процессе (Моделирование на ЭВМ), *Геохимия*, №.7, Стр. 989—1002.

METALLOGENESIS OF STRATABOUND GOLD DEPOSITS IN WEST HUNAN

Niu Hecai and Ma Dongsheng

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu Province)

Abstract

Data of mineral assemblages, wall rock alterations and inclusion thermometry suggest that stratabound gold deposits in west Hunan are mesothermal-epithermal ones formed in weakly reducing and weakly alkaline media. Ore fluids were mixtures of metamorphic water and formation water, in which Au migrated in the form of $[\text{Au}(\text{HS}^-)_2]^-$ complex ions. Minor element geochemical studies show that Au, Sb and W contents of Proterozoic in west Hunan are obviously higher than their average values in the upper continental crust, and a considerable amount of Au, Sb and W occurs in rocks in a form readily to be activated, suggesting that Proterozoic in west Hunan is a typical Au-Sb-W ore-bearing formation. Studies of regional geology, wall rock alteration and sulfur isotopic geochemistry show that ore-forming substances of stratabound gold deposits in west Hunan came mainly from the Au-Sb-W ore-bearing formation.

The authors hold that, under the driving forces of Xuefengian orogeny, formation water of different natures reacted with Proterozoic Au-Sb-W ore-bearing formation of west Hunan, leading to certain degrees of activation and migration of Au, Sb and W. Driven by regional tectonic stress field, ore-forming fluids rich in metallogenic elements migrated towards and concentrated in the structural dilational zone and then mixed with different quantities of metamorphic water. Pressure reducing and fluid mixture caused obvious variations in such physical-chemical parameters of ore fluids as temperatures and pH values and led to the precipitation of metallogenic elements and correspondingly the formation of Au-Sb-W, Au-Sb and single Au stratabound deposits. The ore-forming process of stratabound gold deposits in west Hunan was actually a reaction process between water and rock in an open system of medium-low temperature.