

# 金成矿的物理化学条件研究进展

戴仕炳 刘连登

(长春地质学院)

本文介绍了 G. Friedrich 等将矿相学、蚀变岩相学、流体包裹体和硫化物矿物相等研究紧密结合起来,来解释含金溶液来源和沉淀条件的方法。他们首先根据矿石组构及矿物交生关系准确划分成矿阶段及矿物生成顺序,并测定类质同象矿物的成分,再根据流体包裹体、矿石矿物组合、蚀变带矿物组合确定成矿温度,计算各阶段 pH 值变化范围。在  $\log a(\text{O}_2) - \text{pH}$  和  $\log a(\text{S}_2) - \log a(\text{O}_2)$  图解上就可以确定每个矿化阶段的物化条件及整个矿化过程物化条件的演变。据此,他们在西班牙 Rodalquilar 金矿研究后提出浅成热液中金以  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  形式搬运,在近地表金因 pH 值、总硫活度降低及氧逸度增加而沉淀的成矿模式。

**关键词** 金矿 物理—化学条件 成因模式

金是在何种物理化学条件下沉淀成矿的,这一直是矿床学家研究的主题之一。以著名矿床学家、德国矿物学学会主席 G. Friedrich 教授为所长的德国亚琛工业大学矿物学和矿床学研究所近年来在加拿大和西班牙的金矿研究中,采取了一套很值得我国矿床学工作者借鉴的方法。他们将矿相学、蚀变岩相学、流体包裹体和硫化物矿物相等研究紧密结合起来,对含金溶液的来源及沉淀条件作出合理的解释。硅酸盐及氧化物相图在结晶岩石学研究中的应用已极其广泛,解决了很多有关岩石成因理论问题。虽然硫化物相图研究已有近 50 年的历史,但它的应用还很不普遍。特别是我国矿床学研究中应用不多,这种经济实惠的方法很值得采用。

## 1 矿床学研究揭示的物理化学条件

U. Glasmacher 和 G. Friedrich 等<sup>[1,2,3]</sup>和 K. H. Hoyman 等<sup>[4]</sup>在研究加拿大西北部邻近阿拉斯加的 Sixtymile 河地区的金矿时,详细研究了其矿石学。他们用普通矿相显微镜和电子探针,准确地鉴定矿石中出现的每一种金属矿物,同时测定类质同象矿物的各组分的含量,如自然金中的银含量、闪锌矿中的 FeS 含量等。然后再根据矿石构造及矿物结构,确定成矿阶段、矿物的生成顺序和它们的物化条件。例如加拿大 Sixtymile 河地区金矿化产于晚白垩世强蚀变的安山岩中,矿化类型有浸染状、网脉状和脉状。矿石组合有两类:金—黄铁矿—毒砂

本文 1993 年 8 月收到;杨广华编辑。

(组合 I) 和含银方铅矿—闪锌矿 (组合 I)。这两类矿化均可划分出四个成矿阶段。金—黄铁矿—毒砂组合的第一阶段矿物是含金包体的黄铁矿和石英 (表 1), 第二阶段为黄铁矿、含硫银矿包裹体的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉钼矿、毒砂和少量的金和石英, 第三阶段的矿物组合为含金和毒砂包裹体的黄铁矿和毒砂、石英, 条带状玉髓和黄铁矿为第四阶段的矿物组合。第一阶段和第三阶段自然金中的银含量较高, 分别为 24.61wt% 和 19.84wt%, 第二阶段自然金中的银含量较低, 为 4.8wt%。

表 1 金—黄铁矿—毒砂组合的矿物生成顺序及形成的物理化学条件

Table 1 Paragenetic sequence and physico-chemical condition during formation of the gold—pyrite arsenopyrite occurrence in Sixtymile River area, Canada

	阶段 I	阶段 II	阶段 III	阶段 IV
黄铁矿 (wt-% As)			~2	
毒砂 (At-% As)			28.03	
金 (wt-% Ag)	~24	~1	~20	
闪锌矿 (mol-% FeS)		~6		
黄铜矿				
磁黄铁矿				
方铅矿		Ag-Bi		
硫银矿				
辉钼矿				
石英				
玉髓				
				t
温度 (°C)	150	280	280	200
盐度 [wt-% NaCl 相当量]	2	石盐子晶		25
loga K <sup>+</sup>	-21			-1.9
pH	4.5			4.2 ~ 8.0
loga (O <sub>2</sub> )	-43 ~ -54	-35 ~ -33	~ -37	-34 ~ -45
loga (S <sub>2</sub> )	-0.7 ~ -20	-12 ~ -10	~ -12	-6 ~ -16

含银方铅矿—闪锌矿组合的成矿阶段的矿物顺序和金—黄铁矿—毒砂组合有区别 (表 2)。

表 1 和表 2 不仅清晰地表达出了不同矿化组合金属矿物的生成顺序, 而且表达出了主要矿物每阶段的成分特征和相对应的各阶段的形成温度、盐度等, 值得借鉴 (有关温度等参数获取方法后文详述)。

矿物生成顺序的研究能揭示矿石形成物化条件的区别。金—黄铁矿—毒砂组合中第一阶段仅为黄铁矿—石英, 多金属硫化物仅出现于第二阶段。而含银方铅矿—闪锌矿组合中多金

表2 含银方铅矿—闪锌矿组合的矿物生成顺序及形成的物理化学条件

Table 2 Paragenetic sequence and physico-chemical condition during formation of the Ag-bearing galena-sphalerite occurrence in Sixtymile River area, Canada

	阶段 I	阶段 II	阶段 III	阶段 IV
闪锌矿 (mol-% FeS)	0.2	4 - 12	6	6 - 0.2
黄铁矿				
白铁矿				
磁黄铁矿				
毒砂		43.72		
黄铜矿				
方铅矿		Ag-Bi	Sb-Ag-Bi	
硫铋银矿				
黝铜矿				17.47
(wt-% Ag)				
硫铋铜银矿				
硫砷铜银矿				
火红铜矿				
石英				
黼石				
黄铁矿				
铁白云石				
白云石				
方解石				
温度 (°C) :	170	230	190	190
盐度 (wt % NaCl 相当量) :		8.6		
logaK <sup>+</sup> :		-1.5		
pH :		~5.5		
loga(O <sub>2</sub> ) :		-39 → -40	-46 → -43	
loga(S <sub>2</sub> ) :		-13 → -14	-15 → -12	

属硫化物出现于 I、II、III 共三个阶段。这反映了前者成矿温度要高于后者,也进一步反映了成因细节上的差别。两个矿化组合中也出现一些相同矿物,但矿物成分上有明显区别,如两个矿化组合均含毒砂和方铅矿。而金—黄铁矿—毒砂组合中毒砂砷含量为 28.03At%,而含银方铅矿—闪锌矿组合中毒砂含砷达 43.72wt%(26.85At%);组合 I 中方铅矿为含硫铋银矿包体的方铅矿,而组合 II 中第二阶段为含硫铋银矿的方铅矿,第三阶段为含铋、铋的银矿物。方铅矿中 FeS 含量更有明显不同。

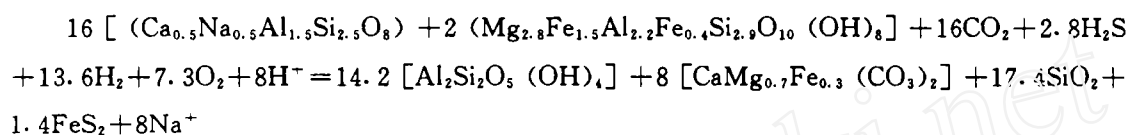
表中也清楚反映了流体成分变化特征,如组合 I 第二阶段包裹体中有石盐子晶,温度最高,氧逸度最高,其后温度、氧逸度均明显降低。所以,表 1、表 2 是对矿床特征的全面概述。

矿石学研究还可以较准确地提供矿物形成的实际温度。成矿温度是成矿物理化学条件中的重要参数,常用二相流体包裹体的均一法去测定。但必须要根据压力校正,而利用矿物固熔体分解结构则相对方便可靠。如根据 Craig (1967) 的研究,方铅矿中硫铋银矿的初熔说明组合 I 第二阶段形成温度为  $215 \pm 15^\circ\text{C}$ 。

## 2 热液蚀变与物理化学条件

热液蚀变研究的首要任务是确定蚀变分带及各带之间的化学反应式。前者借助于显微镜, 根据蚀变矿物组合就很容易做到这一点, 而后者则需要进一步借助于电子探针, 以确定蚀变矿物的成分。

上述矿石矿物组合 I 有关的热液蚀变可分三个带: 青盘岩化带 (带 I)、石英—碳酸盐—高岭土化带 (带 II) 和石英—多硅白云母带 (带 III)。各带之间的转变, 可用相应的反应方程式来表达。如带 I 内斜长石和绿泥石转变为高岭石、铁白云石、石英和黄铁矿的反应方程式为:



特定的金属矿物组合和特定的蚀变矿物组合都代表了含矿流体一次成分和物理化学条件的变化。含矿流体性质是随时间的演化而变化的, 要想准确了解成矿流体性质, 必须准确确定成矿阶段以及各阶段内的矿物共生组合。无疑这种研究方法很值得我们借鉴。把蚀变矿物组合和特定阶段的金属矿物组合联系起来有重要意义。在野外根据金属矿物组合的产状与蚀变带的穿切关系可能会解决这一问题。

蚀变矿物组合研究也可以为成矿物理化学条件提供很多信息, 例如温度。蚀变带中铁白云石—白云石—方解石组合说明热液温度在 195℃ 以上 (Mcdowell 和 Paces, 1985)。白云石和方解石稳定共生的温度为 195℃ 和大约 280℃。多硅白云母作为蚀变矿物出现说明温度为 280℃ 左右 (Mcdowell 和 Elders, 1980; Scrodon 和 Eberl, 1987)。综合利用流体包裹体均一温度、金属矿物组合及固熔体结构、蚀变矿物组合来确定某一成矿阶段的温度, 这更为合理。

蚀变带之间矿物组合转变的化学反应方程式也极为有用, 它可以用来计算成矿溶液的 pH 值范围。例如, 根据钾长石—白云母反应和白云母—高岭石反应, 以温度和摩尔数, 可以计算出 Sixtymile 地区金矿溶液 pH 值范围如下。

金—黄铁矿—毒砂脉:

阶段 I    pH150℃ 大约为 4.6    中性 pH150℃ 为 5.8

阶段 II    4.2 < pH200 < 6.0    中性 pH200℃ 为 5.7

蚀变带 I:

长石    4.2 < pH250℃ < 5.7    中性 pH250℃ 为 5.6

绿泥石    pH260℃ = 5.7    中性 pH260℃ 为 5.6

绿泥石    pH180℃ = 6.4    中性 pH180℃ 为 5.7

含银方铅矿—闪锌矿脉:

阶段 I     $\text{pH}230^\circ\text{C}=5.5$     中性  $\text{pH}230^\circ\text{C}=5.6$

蚀变带 I:

绿泥石     $\text{pH}230^\circ\text{C}=5.8$     中性  $\text{pH}230^\circ\text{C}=5.6$

### 3 硫化物矿物相图确定成矿物理化学条件

主要成矿阶段的温度和 pH 值得出后, 根据每一阶段的共生矿物组合, 可在硫化物相图, 即  $\log a(\text{O}_2) - \text{pH}$  和  $\log a(\text{S}_2) - \log a(\text{O}_2)$  图解上 (图 1) 求得相应的物化条件。在  $\log a(\text{O}_2) - \text{pH}$  和  $\log a(\text{S}_2) - \log a(\text{O}_2)$  图解上, 主要硫化物和氧化物均有其相对固定的稳定存在区间, 不同硫化物之间也有相应的相转变线。温度不同, 硫化物稳定范围及相转变线都要发生变化。所以, 知道成矿温度和特定矿物组合就可以知道  $\log a(\text{S}_2)$  和  $\log a(\text{O}_2)$  的范围。例如, 组合 I 第一阶段反映矿物沉淀氧逸度为  $-54 < \log(\text{O}_2) < -43$ , 硫逸度为  $\log a(\text{S}_2) = -7$  和  $\log a(\text{S}_2) = -20$  (图 1-A, B)。根据黄铁矿中早期磁黄铁矿包体, 然后是闪锌矿的结晶 (6mol%FeS), 第二阶段氧逸度增加 [ $\log a(\text{O}_2)$  为  $-35 \sim -33$ ], 硫逸度也增加为:  $\log a(\text{S}_2)$  为  $-12 \sim -10$  (图 1-C, D)。第三阶段矿物反映  $\log a(\text{O}_2) = -30$ , 黄铁矿中毒砂包体说明  $\log a(\text{S}_2) = -12$  (图 1-E, F)。根据蚀变矿物, 说明黄铁矿 N 形成于  $\log a(\text{O}_2)$ :  $< -34$ ,  $> -45$ , 硫逸度为  $\log a(\text{S}_2) < -6$ ,  $> -16$  (图 1-G, H)。

运用同样方法可以求得含银方铅矿—闪锌矿组合形成的物理化学条件 (表 2)。

因此, 两个组合的矿物成分、矿物共生规律、围岩蚀变等反映了两成矿过程的不同。金—黄铁矿—毒砂组合主要由溶液沸腾形成的, 而含银方铅矿—闪锌矿组合为不同物理化学条件的两种流体混合 (深部碱性溶液和近地表地下水混合) 而形成的。

需要强调说明的是, 确定成矿物理化学条件, 除了要考虑温度、金属矿物组合和蚀变矿物组合外, 还要考虑溶液中钾含量及硫总量以及压力。P. Sanger—von Oepen 等 (1991)<sup>[5]</sup> 在研究西班牙东南部 Rodalquilar 金矿床的物化条件时, 曾做了不同条件下硫化物  $\text{pH} - \log a(\text{O}_2)$  图解, 以准确判断溶液物化条件的演化 (图 2)。

P. Sanger—Von Oepen 等 (1991) 在研究该矿床时, 所用样品取自一个  $> 830\text{m}$  的钻孔, 矿化温度从  $175 \sim 300^\circ\text{C}$  不等, 不同温度范围出现不同矿化组合。例如, 在  $110 \sim 120\text{m}$   $200^\circ\text{C}$  时出现的矿物组合为  $\text{Po} + \text{tn} + \text{Cu} + \text{Py}$ , 它反映  $\log a(\text{O}_2)$  大于  $-46$  而小于  $-36$ 。在  $275^\circ\text{C}$  深度为  $320 \sim 650\text{m}$  时为  $\text{Po} + \text{mg} + \text{tn} + \text{Cpy} + \text{py} + \text{Cv}$  等, 其  $\log a(\text{O}_2)$  为小于  $-30$  而大于  $-38$ , 说明随深度变浅,  $\log a(\text{O}_2)$  增加。而且原作者认为其 pH 值和  $\log a(\text{O}_2)$  从深至浅有跳跃性, 说明流体有两种来源, 一种为中性 pH 值, 氧逸度低的流体 (岩浆热液), 另一种为很低的 pH 值, 氧逸度高的流体。金的沉淀与两种流体的相互作用有关。

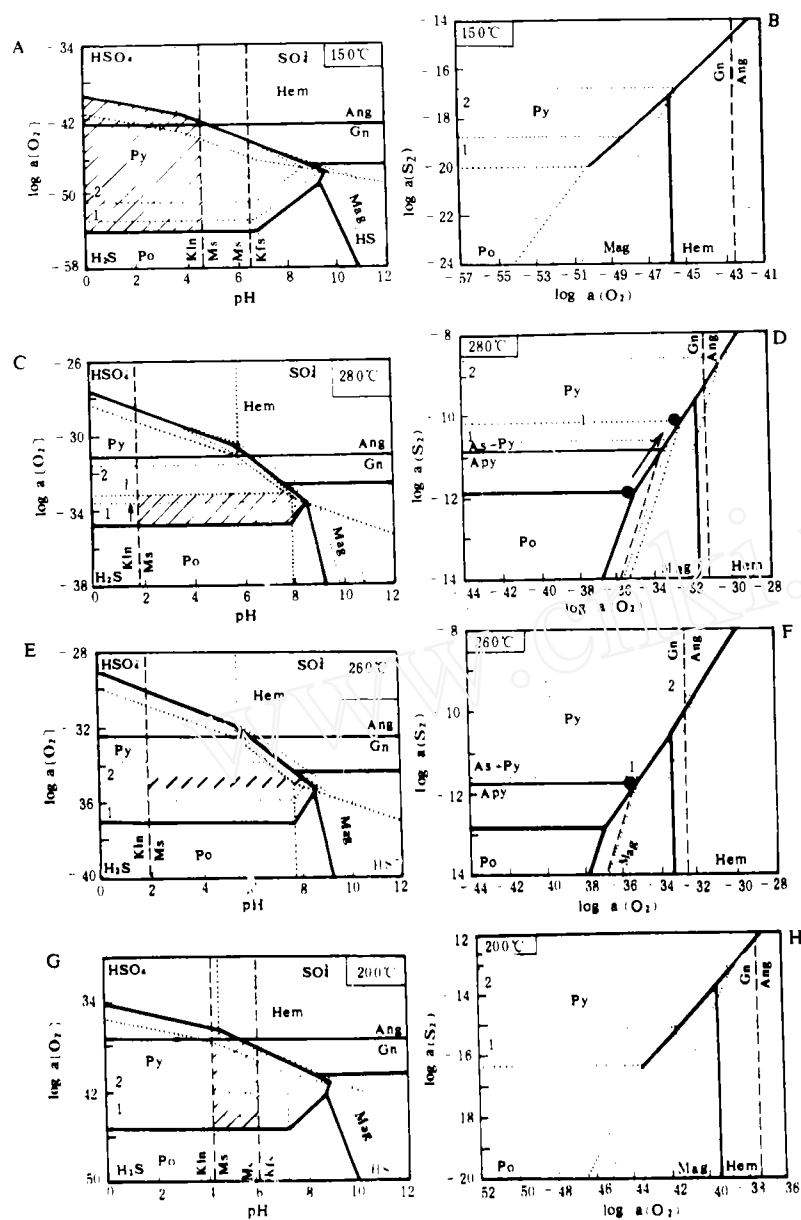


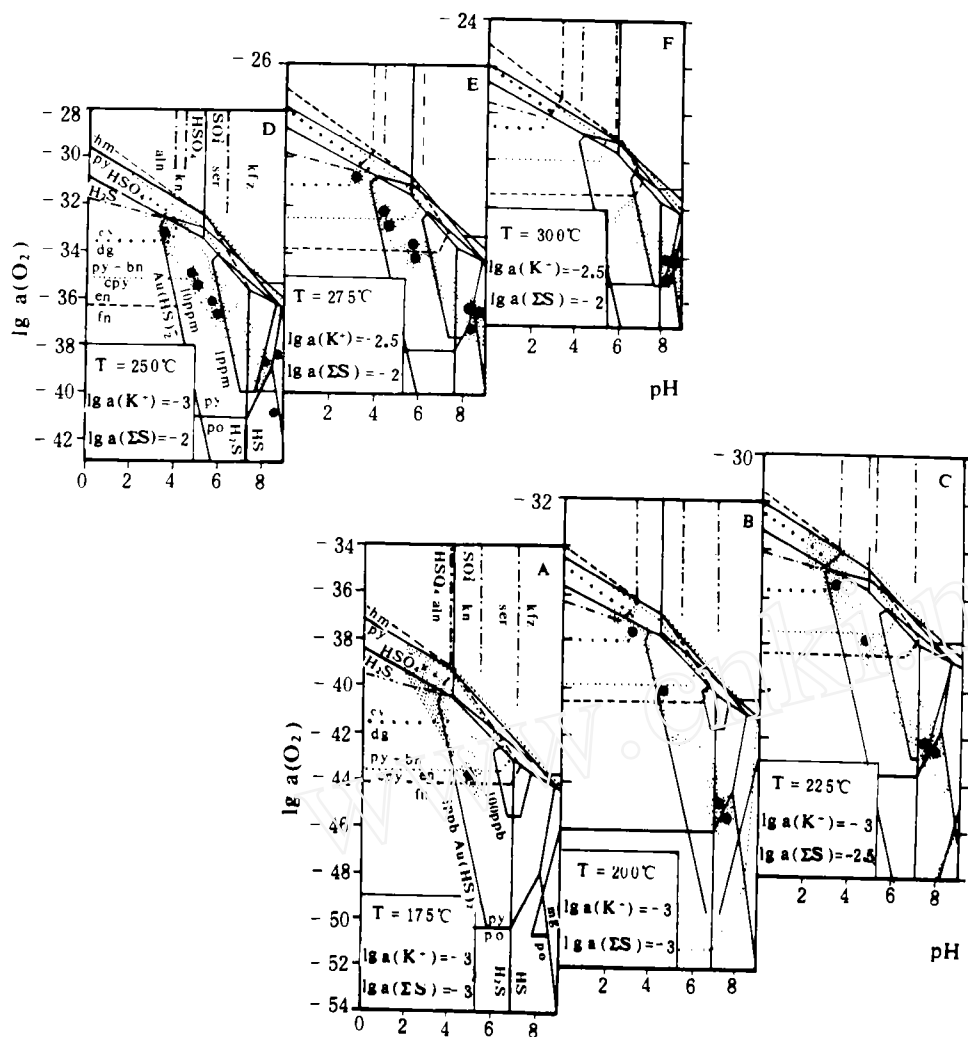
图1 金-黄铁矿-毒砂组合的  $\log a(\text{O}_2)$ -pH 和  $\log a(\text{S}_2)$ 、 $\log a(\text{O}_2)$  图解

(据 Glasmacher 等, 1991, 1992)

Fig. 1  $\log a(\text{O}_2)$ -pH and  $\log a(\text{S}_2)$  -  $\log a(\text{O}_2)$  diagrams of the mineralization stages in the gold-pyrite-arsenopyrite occurrence in Sixtymile River area

阴影区为矿物沉淀区 (field of enrichment); ←箭头代表物化条件变化方向 (direction of change in physico-chemical conditions);

Mag-磁铁矿; Hem-赤铁矿; py-黄铁矿; Po-磁黄铁矿; kln-高岭石; Ms-白云母; Kfs-钾长石

图2 温度为175—300℃范围内 pH—loga (O<sub>2</sub>) 系列图解

(据 Sanger—Von Oepen 等, 1991)

Fig. 2 Series of pH—loga (O<sub>2</sub>) diagrams at temperatures between 175—300℃

邻近矿物相边界线的黑点指示特定温度下的矿物组合 (Black dots next to phase boundaries refer to ore minerals observed at the specified temperatures); 点画范围表示矿化及围岩蚀变的 pH 和 loga (O<sub>2</sub>) 条件 (stippled areas characterize the pH and log (O<sub>2</sub>) conditions during ore mineralization and wallrock alteration); py—黄铁矿, Po—磁黄铁矿, hm—赤铁矿, Cu—铜蓝, bn—斑铜矿, Cpy—黄铜矿, en—硫砷铜矿, tn—砷黝铜矿, Kfs—钾长石, Ser—绢云母, Kn—高岭石, aln—明矾石.

#### 4 浅成热液金矿床成因模型

加拿大和澳大利亚地质工作者对产于火山岩和浅成侵入岩的 Epitherma 金矿床曾提出过不同的成因模型, 有的强调岩浆热液为主, 有的则倾向于地下水热液成矿. P. Sanger—Von Oepen, G. Friedrich 等 (1990)<sup>[6]</sup> 对西班牙东南部 Rodalquilar 金矿和 Triunfo, Maria J. Safa 金矿进行上述一系列研究后, 提出了略有不同的成因模型.

Rodalquilar 地区金矿化主要受破火山口构造控制。火山岩以辉石—角闪安山岩、英安岩—流纹岩为主,时代为 15—8Ma。火山间隙期有海侵。蚀变以泥化为主,从矿体向外可分强泥化带、泥化带到区域性青盘岩化。流体包裹体研究说明金是从 170—250℃ 的低盐度流体 (2%—5%wtNaCl 相当量) 中沉淀的。但在 Rodalquilar 矿山存在以高盐度 (>40wt%)、矿物子晶 (石盐)、多相 (三相) 包体、中等 pH 值为特征的流体,与斑岩型铜矿的流体包裹体相似。该流体应与深部闪长质侵入体有关,即代表岩浆热液。

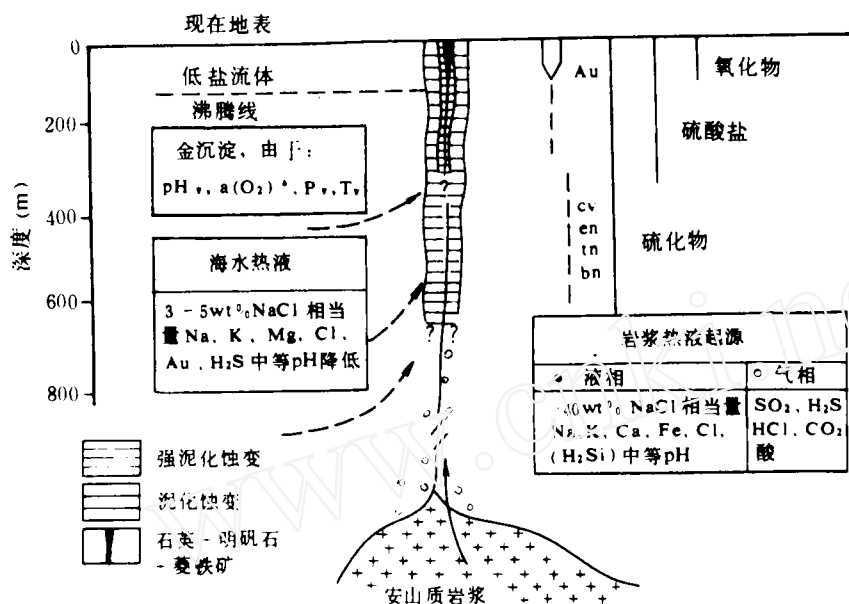


图 3 Rodalquilar 金矿床热液系统示意模型

Fig. 3 Schematic model for the hydrothermal system at Rodalquilar, Spain

(蚀变带宽度未按比例尺; Cu—铜蓝, en—硫砷铜矿, bn—斑铜矿, tn—砷黝铜矿)

作者认为,尽管在 Rodalquilar 地区金矿化空间上局限于环状构造中心部位,即强烈泥化蚀变带内,但金矿化与岩浆流体无成因关系,原因:(1)强烈泥化带(认为是岩浆热液蚀变产物)延深(>320m)和金矿化(大约 120m)延深无对应关系。(2)金矿化与细粒石英、明矾石及黄铁矿有关,而它们形成于泥化蚀变形成的多孔石英之后。(3)在 864m 钻孔的 50m 上部,均一温度保持在 175℃。这一范围大致与最高金矿化品位相吻合。这个均一温度偏离理想的沸腾曲线。而且在地表还见有热液形成的角砾(液压角砾岩)。这些都解释为有限热液环流形成的。(4)从 Rodalquilar 矿床自中心向边缘一直向外到 Triunfo 和 Maria Josefa 矿山,盐度降低,而盐度降低对金品位没有发生影响。

因此,作者提出浅成金矿成因模型(图 3)。延伸很大的强烈泥化蚀变是由酸性的岩浆热液形成的,而近地表的金矿化与低盐度流体(可能为海水)有关。金以  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  形式搬运,在近地表时,由于 pH 值及硫逸度的快速降低和氧逸度升高而使金沉淀。这一模型说明,该类金矿的很多特征与岩浆热液形成的斑岩铜矿相似。原作者强调,金的沉淀,最主要是和可能为海水的低盐度流体的沸腾有关。如果这一假说成立的话,在找矿过程中应充分泥化蚀变带中溶液沸腾的部位,其标志是:多孔组构、充填构造、角砾状构造、气相包体为主等。



## 5 参考文献

- 1 U. Glasmacher & G. Friedrich. Volcanic hosted "epithermal type" Gold—sulfide mineralization and their enrichment processes, Sixtymile River area, Yukon Territory, Canada, BRAZIL GOLD91 E. A. Ladeira (ed), 1991, Balkema, Rotterdam, 1991, p. 121—134.
- 2 U. Glasmacher & G. Friedrich. Gold—sulphide enrichment processes in mesothermal veins of the Sixtymile River area, Yukon Territory, Canada, In: Yukon Geology, 1992, 3, 292—311.
- 3 U. Glasmacher & G. Friedrich. Volcanic—hosted epithermal gold—sulfide mineralization and associate enrichment processes, Sixtymile River area, Yukon Territory, Canada, In: Yukon Geology, 1992, 3, 271—2914.
- 4 K—H. & G. Friedrich. Gold and sulphide mineralization in the Hunker Creek area, Yukon Territory, Canada. In: Yukon Geology, 1990, 3, 12—326.
- 5 P. Sanger—von Oepen & G. Friedrich. Epithermal gold mineralization at Rodalquilar, SE—Spain; Some physical—chemical conditions during ore formation and accompany wallrock alteration. In: Source, Transport and Deposition of Metal, Pagel & Leroy (ed) 1991 Balkema, Rotterdam, 1991.
- 6 P. Sanger—von oepen, G. Friedrich & A. Kisters, comparison 1990 between the fluid characteristics of the Rodalquilar and two neighbouring epithermal gold deposits in Spain. Mineral. Deposita 1990, 25 (Suppl. ), 36—41 1990.

## RECENT DEVELOPMENT OF THE STUDY OF PHYSICO—CHEMICAL CONDITIONS DURING GOLD MINERALIZATION

Dai Shibing    Liu Liandeng

(Changchun University of Earth Science)

### Abstract

The paper shows the means that G. Friedrich and other economic geologists explain the sources and precipitation conditions of gold—bearing solution according to the studys on mineragraphy, alteration petrography, fluid inclusions and sulfide phases. The paragenetic studies of the gold occurrences document the stages of mineralization. Based on the fluid inclusions and mineral assemblages in ores, the temperatures and the pH value ranges of the stages can be identified. By using of  $\log a(\text{O}_2)$ —pH and  $\log a(\text{S}_2)$ — $\log a(\text{O}_2)$  diagrams the physicochemical conditions of gold mineralization can be deduced. Based on the study Rodalquilar gold deposit Spain, they proposed that gold in epithermal gold deposits has been transported as  $\text{Au}(\text{HS})^{-1}$  by fluids of moderate pH and reducing properties. The reason for gold precipitation in the near surface environment must have a rapid decrease in pH and total sulfur activity and an increases in oxygen activity.

**Key words**    gold mineralization    physico—chemical    condition genetic model

**作者简介**    戴仕炳 男 生于1963年, 1988年毕业于长春地质学院, 现任长春地质学院讲师, 从事矿床学教学和研究工作。通讯地址: 长春市建设街79号; 邮政编码: 130061。