

文章编号 10258-7106 (2008) 06-0714-13

豫西前河构造蚀变岩型金矿成矿过程中的 流体-岩石反应*

曹 焱^{1, 2}, 李胜荣^{1, 2}, 申俊峰^{1, 2}, 要梅娟^{1, 2}, 李庆康¹, 毛付龙¹

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质大学岩石圈构造、
深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 前河金矿区位于华北地台南缘, 赋存在中元古界熊耳群安山岩和英安岩中, 矿体受断裂破碎带控制。含矿热液在迁移过程中与围岩发生了广泛的流体-岩石反应而引起热液蚀变。本区石英中有 4 种类型的流体包裹体, 均一温度范围为 145~331℃, 其中含 CO₂ 包裹体的完全均一温度主要分布在中-高温区。成矿流体的密度和压力变化范围分别是 0.68~0.94 g/cm³ 和 (367.01~896.55) × 10⁵ Pa。金大量沉淀成矿时的流体特征为: 温度 213~260℃、密度 0.80~0.89 g/cm³ 和压力 (502.86~710.57) × 10⁵ Pa。流体相为 SO₄²⁻ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ 型, CO₂/H₂O 比值及 N₂、H₂S、Ar、C₂H₆ 等挥发分的含量明显增高, *f*(CO₂)、*f*(H₂S)、*f*(CH₄) 和 *E_h* 值增大; *f*(O₂)、*f*(H₂O) 和 pH 值减小。在青磐岩化安山岩的基础上发生的流体-岩石反应是造成本矿床金沉淀成矿的最主要原因。

关键词 地球化学 金矿床 流体包裹体 构造蚀变岩 流体-岩石反应 前河

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Fluid-rock interaction in ore-forming process of Qianhe structure-controlled alteration-type gold deposit in western Henan Province

CAO Ye^{1, 2}, LI ShengRong^{1, 2}, SHEN JunFeng^{1, 2}, YAO MeiJuan^{1, 2}, LI QingKang¹ and MAO FuLong¹

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobe Technology, China University of Geosciences, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract

The Qianhe gold deposit controlled by the fracture zone is hosted in the ductile shear zone of weakly metamorphosed rocks of the Middle Proterozoic Xiong'er Group. The ores occur as veinlike or lenticular bodies within altered andesitic-dacitic host rocks. Hydrothermal alteration resulted from the fluid-rock interaction in the migration process of ore-bearing hydrothermal fluids. There are four types of fluid inclusions in the gold deposit. Fluid inclusion data indicate that the temperature, density and pressure of the fluids are 145~331℃, 0.68~0.94 g/cm³ and (367.01~896.55) × 10⁵ Pa in the whole fluid-rock interaction stage and 213~260℃, 0.80~0.89 g/cm³, (502.86~710.57) × 10⁵ Pa in the gold deposition stage. Besides, the fluids of the main ore-forming stage are characterized by the increasing of the CO₂/H₂O ratio, the content of N₂, H₂S, Ar, C₂H₆ in vapor

* 本文得到高等学校创新引智计划(B07011)的资助

第一作者简介 曹 焱, 男, 1983 年生, 博士生, 主要从事成因矿物学及找矿矿物学研究。E-mail: cykaiyang@163.com

收稿日期 2007-12-12; 改回日期 2008-08-27。李 岩编辑。

phase components, and the values of $f(\text{CO}_2)$, $f(\text{H}_2\text{S})$, $f(\text{CH}_4)$ and E_h , and the deceasing of $f(\text{O}_2)$, $f(\text{H}_2\text{O})$ and pH. The fluid ion components are characterized by $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+$. The fluid-rock interaction based on propylitic andesite seems to be the main cause for gold deposition.

Key words: geochemistry, gold deposit, fluid inclusion, structure-controlled alteration rocks, fluid-rock interaction, Qianhe

前河金矿位于河南省嵩县旧县镇境内,距县城45 km。西临潭头金矿,北临瑶沟金矿,地理坐标为 $111^\circ 49' 48''\text{E} \sim 111^\circ 52' 12''\text{E}$, $34^\circ 45' 08''\text{N} \sim 34^\circ 47' 23''\text{N}$ 。矿区附近有洛阳栾川公路通过,向北35 km的洛阳站与陇海、焦枝两铁路沟通,交通便利。

构造蚀变岩型金矿是指由脆-韧性或韧性剪切构造带内的各类岩石被含矿热液交代而形成的金矿床。该类金矿具有受构造控制和强烈的围岩蚀变2大特征。其形成的实质是,上升的含矿热液沿运移通道(常为具剪切性质的构造断裂,但也可以是先形成的脉体或不同岩性接触面等)与围岩发生交代作用——流体-岩石反应,导致流体的性质发生显著变化,在围岩蚀变的同时,热液中金的溶解度迅速降低并沉淀成矿(范宏瑞等,1998)。

自20世纪80年代发现前河构造蚀变岩型金矿以来,已有众多学者对其进行了详细的研究(李莉等,1999;巴安民等,2006;裴玉华等,2006),研究工作涉及矿床地质、矿物学和地球化学。卿敏等^①较为详细地总结了前河金矿的地质地球化学特征,并进行了找矿预测,取得了有重要参考价值的成果。但前人对本区流体-岩石间的相互作用,以及流体在金成矿过程中的演化特征的研究尚欠缺,流体-岩石反应是这类金矿成矿系统最显著的特征之一,对该流体-岩石反应体系地球化学进行综合探讨,可以深入地认识该金矿的形成机理,并对深部及外围找矿提出理论依据。

1 区域和矿区地质

前河金矿区位于华北地台南缘(图1),外方山断隆区的熊耳地体中(即熊耳山地区)。熊耳地体地处华北克拉通与秦岭褶皱系衔接部分北侧的华北克拉通南缘活动带,主要由早前寒武纪变质基底太华群、

中元古代盖层熊耳群安山岩建造(陈衍景等,1992; Chen et al.,1997)、燕山期深成花岗岩类和斑岩-爆破角砾岩等构成。

侏罗纪—白垩纪初,本区构造体制发生转换,主应力场由南北向转为东西向,形成本区北东向构造系统,沿着秦岭造山带北缘发生了大规模的折沉滑脱、伸展拉张、逆冲推覆等构造运动,并伴有强烈的以酸性岩浆为主的岩浆活动。最早的酸性岩为燕山早中期的五丈山正长花岗岩体,之后,又有嵩坪、花山、合峪等花岗岩基形成(李永峰等,2005)。合峪岩体为分布于本区南部规模较大的花岗岩体,以岩株形式侵入于熊耳群火山岩中,岩石类型主要为似斑状黑云二长花岗岩,具多期次活动特征,成因类型为壳幔质重熔花岗岩(袁鹤皋等,1997)。本区发现的金矿床集中分布于合峪岩体北部边缘,体现了合峪岩体对金矿的控制特征。燕山期岩浆侵入活动为成矿提供了热力条件,驱使地层中的矿质活化迁移(李胜荣,1994)。

区域上经历了长期、多次、复杂的构造变动,近东西向-北西西向的区域大断裂——马超营断裂带为本区的控矿断裂带(刘红缨等,1998)。长时期的构造活动和多期热液活动叠加,使得断裂带中蚀变发育,贵金属、多金属化强烈。除前河金矿外,本区还有康山、红庄、潭头、庙岭、纸房等十几个大、中、小型金矿也受该断裂带控制(罗铭玖等,2000)。

金矿体严格受近东西向断裂控制。含金构造蚀变带长3 800 m,宽5~30 m。分东、中、西3个矿段。东段位于葛沟口—沟脑分水岭,矿带长1 100 m,宽5~30 m,平均20 m。东矿段共圈定金矿体3个,以IV号矿体规模最大(图2),矿体长度830 m,厚度最大14.97 m,平均3.05 m,呈不规则状、豆荚状,沿走向及倾向具膨缩、分支现象,88线以西走向 95° ,以东走向 110° ,倾向北东,倾角 $58^\circ \sim 76^\circ$,平均 67° (图3),

① 卿 敏,等. 2001. 河南省嵩县前河金矿区外围物化探找矿预测研究. 内部资料.

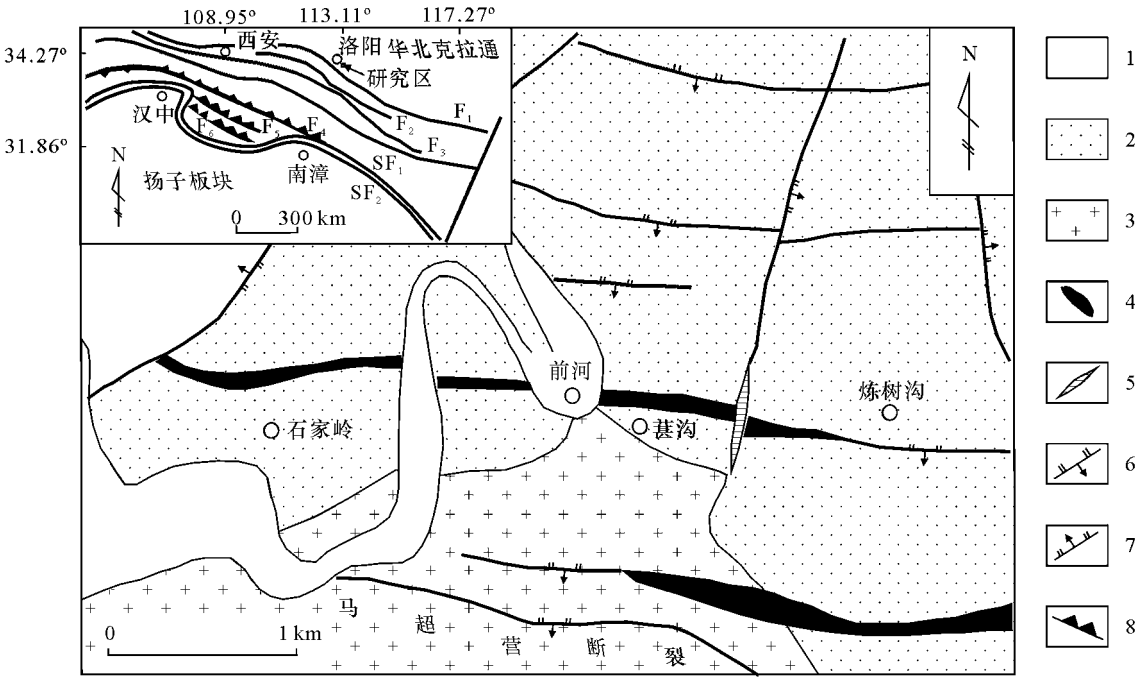


图 1 河南前河金矿矿区地质简图(据李莉等,1999 张元厚等,2006 修编)

1—第四系;2—中元古界熊耳群;3—燕山晚期斑状二长花岗岩;4—构造蚀变岩型金矿体;5—角砾岩脉;6—逆断层;7—正断层;8—冲断带;SF₁—简单缝合带;SF₂—勉略缝合带;F₁—秦岭北界断裂带;F₂—马超营断裂带;F₃—洛南-栾川断裂带;F₄—十堰冲断带;F₅—石泉-安康冲断带;F₆—红椿坝-利平冲断带

Fig. 1 Sketch geological map of the Qianhe gold deposit, Henan Province (modified after Li et al. , 1999 Zhang et al. , 2006)
1—Quaternary;2—Middle Proterozoic Xiong'er Group;3—Late Yanshanian porphyritic monzonitic granite;4—Structure-controlled alteration-type gold body;5—Breccia dyke;6—Reverse fault;7—Normal fault;8—Thrust belt;SF₁—Shangdan suture zone;SF₂—Mianlue suture zone;F₁—North fractured zone boundary of Qinling Mountains;F₂—Machaoying fractured zone;F₃—Luonan-Luanchuan fractured zone;F₄—Shiyan thrust belt;F₅—Shiquan-Ankang thrust belt;F₆—Hongchunba-Liping thrust belt

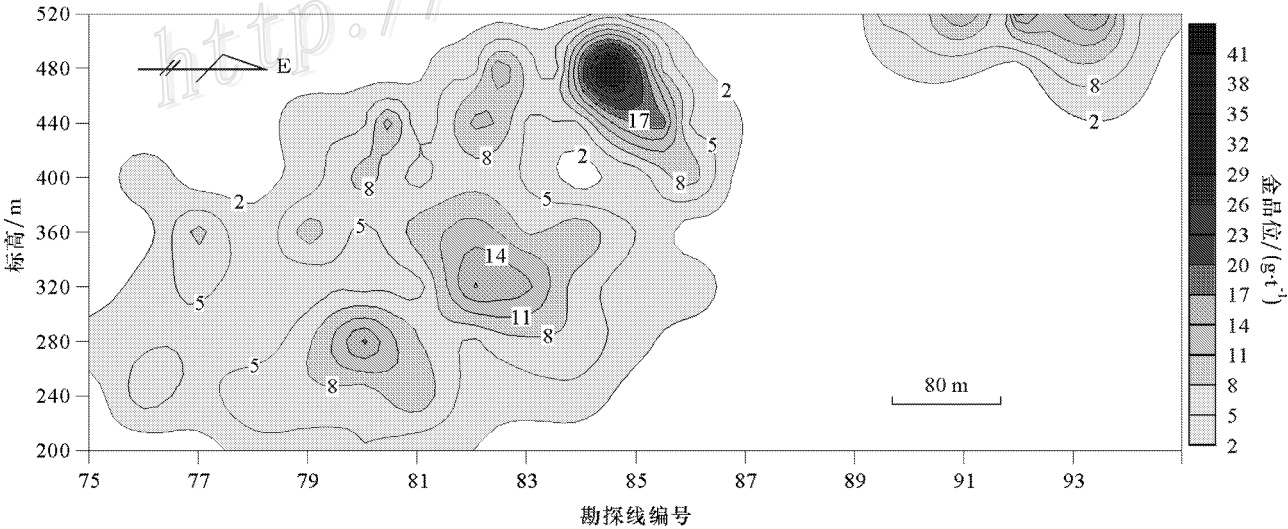


图 2 河南前河 IV 号矿体金品位等值线垂直纵投影图

Fig. 2 Vertical projection contour diagram of gold grade of No. IV ore body

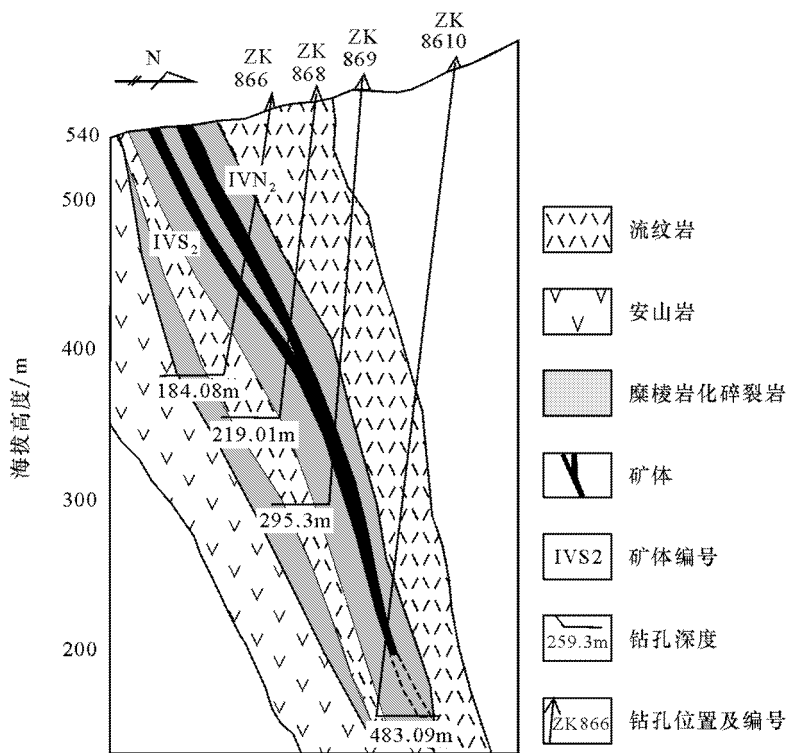


图3 前河金矿87号勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along No. 87 exploration line of the Qianhe gold deposit

具浅部缓深部变陡之特点。金品位最高为 238.0 g/t, 平均 7.87 g/t, 预计金总储量约 10 t (燕建设等, 2005)。矿石中的矿物成分十分复杂, 其中矿石矿物以黄铁矿为主, 次为方铅矿和闪锌矿及少量的黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、自然金和银金矿, 载金矿物主要为粒度极细 (粒径多为 0.005~0.1 mm) 的三角十二面体黄铁矿。金矿物大多呈粒间金分布, 且只分布于一定方向的黄铁矿浸染脉体中之黄铁矿粒间, 包体金及裂隙金极少。脉石矿物主要为石英、钾长石和绢云母, 次为方解石、萤石、黑云母、绿泥石、绿帘石及少量的石榴子石、榍石和金红石。次生矿物有褐铁矿、白铅矿、黄钾铁矾、针铁矿等。

2 热液蚀变及成矿阶段划分

2.1 热液蚀变类型及分带

前河金矿热液蚀变强烈, 形成了以中低温热液矿物组合为主的各种类型蚀变岩。主要的热液蚀变类型有钾长石化、黑云母化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化。其中钾长石化、青盘岩化、绢英岩化和黄铁矿化较发育, 多金属硫化物化较

弱, 仅形成少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。

(1) 钾长石化: 肉红色, 主要沿断裂两侧分布, 数十厘米到二三米不等。由于后期蚀变影响, 钾长石脉体 (图 4B) 发生了绿泥石化, 有黑绿色绿泥石细脉交切或者团块状交代, 部分还有黄铁矿细脉充填。

(2) 青磐岩化: 该蚀变岩是在中低温热液作用下形成的, 呈墨绿色、暗绿色, 基本保持原安山岩特征。矿物组成主要是新生的绿泥石、绿帘石, 以及原岩斜长石。该类型蚀变分布范围广, 主要沿着断裂呈面型发育。

(3) 绢云母化: 该蚀变类型的岩石呈浅黄绿色, 极细粒鳞片变晶结构。绢云母呈黄色, 鳞片状, 一般为十几微米, 微弱闪突起 (图 4F)。伴随黄铁矿化, 黄铁矿主要呈稀疏浸染状分布, 含量不均匀。

(4) 硅化: 石英集合体呈浸染状、团块状、细脉状和网脉状交代围岩, 常靠近矿脉, 与绢英岩和黄铁绢英岩过渡分布。还有些以黄铁石英脉的形式产出, 脉体宽几厘米不等。

(5) 黄铁矿化: 成矿前期的黄铁矿呈细-粗粒、自形至半自形立方体状, 星散分布于蚀变安山岩和乳白色石英脉中, 主成矿期的黄铁矿以细-微细粒、自

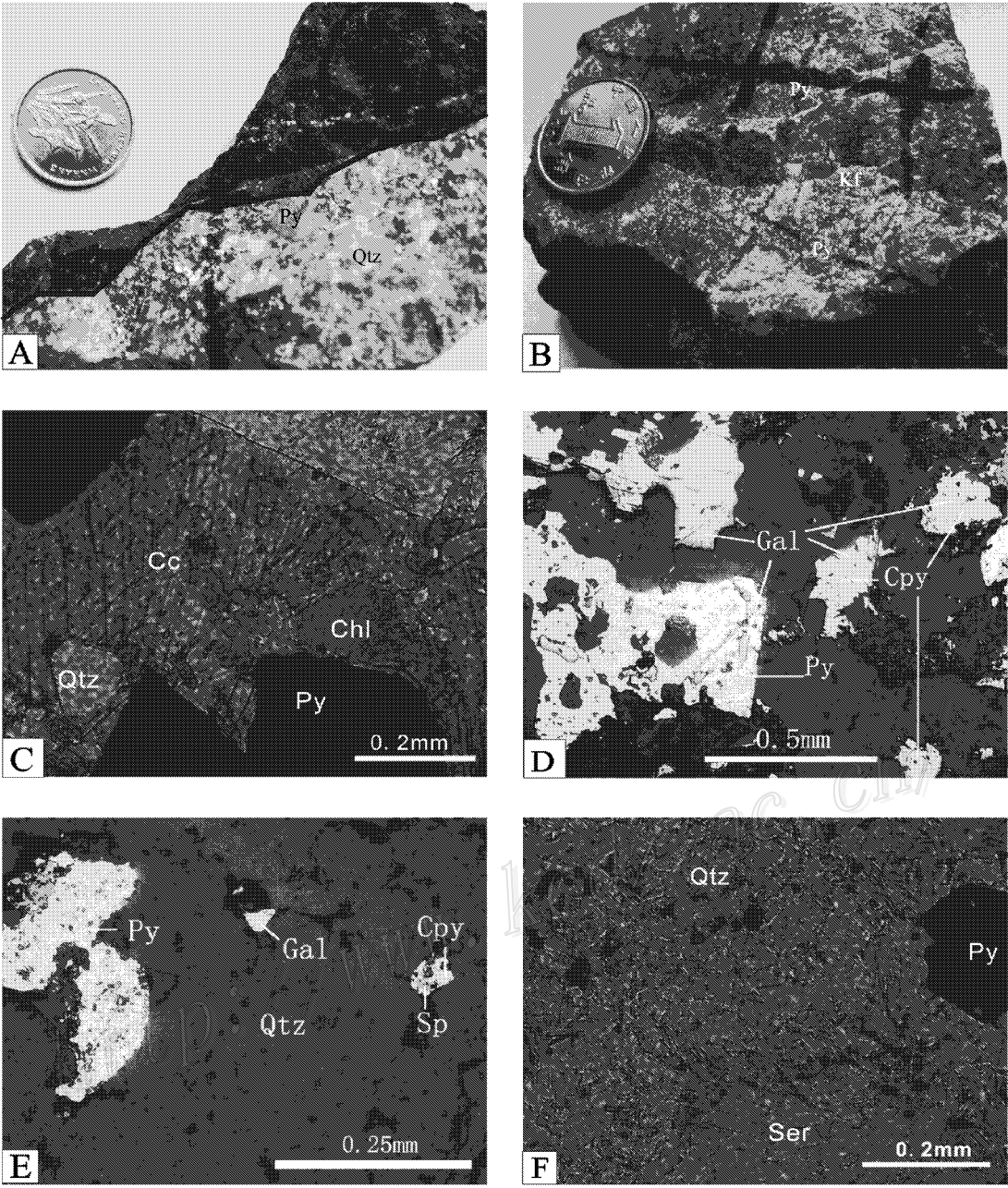


图 4 前河金矿矿石和脉石矿物组合

A. 黄铁石英英脉; B. 肉红色钾长石脉体和黄铁矿细脉; C. 方解石包裹绿泥石和石英(单偏光); D. 方铅矿包裹乳滴状黄铜矿, 部分方铅矿被黄铁矿包裹(反光); E. 黄铜矿包裹闪锌矿(反光); F. 具鳞片花岗岩变晶结构的绢英岩(单偏光)。矿物代号: Gal—方铅矿; Cpy—黄铜矿; Py—黄铁矿; Cc—方解石; Qtz—石英; Chl—绿泥石; Sp—闪锌矿; Ser—绢云母

Fig. 4 The assemblages of ores and gangue minerals in the Qianhe gold deposit

A. Pyrite-quartz vein; B. Reddish K-feldspar vein and pyrite veinlet; C. Chlorite and quartz enclosed in calcite (plane polarized light); D. Milk drop-like chalcopyrite enclosed in galena, galena partly enclosed in pyrite (reflector); E. Sphalerite enclosed in chalcopyrite (reflector); F. Phyllic alteration rock with lepidogranoblastic texture (plane polarized light). Gal—Galena; Cpy—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Cc—Calcite; Qtz—Quartz; Chl—Chlorite; Sp—Sphalerite; Ser—Sericite

形至半自形五角十二面体状浸染分布于角砾胶结物或绢云母 硅化碎裂蚀变岩中。

(6) 碳酸盐化 热液后期碳酸盐化强烈, 主要交

代先成矿物或者呈细脉浸染状沿裂隙发育, 部分淡红色碳酸盐细脉沿着岩石裂隙稳定延伸。

(7) 萤石化 萤石, 紫褐-粉红色, 主要以细脉状、

网状产出, 规模和强度远不及碳酸盐化。

根据实地观察和室内镜下薄片鉴定, 前河矿区破碎带内的围岩蚀变类型及强度自构造带中心向两侧围岩, 一般具有对称分布的特点(图 5), 尽管各蚀变带的宽度可能不完全相同。

2.2 成矿阶段划分及矿物组成

成矿期的开端, 应以介质由碱性向酸性, 氧化向还原, 金由迁移向沉淀的转变算起(李胜荣, 1993)。通过宏观的野外观察并综合各类蚀变矿物组合之间的交代及脉体穿切关系发现: 蚀变作用应是多期次相继发生, 但又不是连续的过程。根据野外实地观察和室内镜下研究, 将前河金矿床划分为 3 个成矿阶段(表 1)。

第Ⅰ阶段为成矿前期的黄铁矿-石英阶段。黄铁矿石英脉中, 黄铁矿主要以立方体自形晶稀疏浸染状分布(图 4A), 部分可见晶面条纹, 粒度 0.1~0.2 cm 并有黄铁矿细脉沿钾长石脉体分布或切割钾长石脉体(图 4B), 脉宽 2 mm 左右。

第Ⅱ阶段为主成矿期的石英-黄铁矿阶段。该阶段的黄铁矿和多金属硫化物浸染状分布于矿石中。矿石矿物以黄铁矿为主, 矿体附近可见少量方铅矿团聚体, 零星出现棕黄色闪锌矿, 具锍色黄铜矿等。黄铜矿呈乳滴状被方铅矿包裹, 具有典型的包含结构(图 4D、4E)。

第Ⅲ阶段为成矿期后的碳酸盐-卤化物阶段。碳酸盐化广泛发育, 贯穿整个蚀变带, 主要以细脉充填方式存在。大量绿泥石蚀变成碳酸盐集合体。方解石结晶完好, 自形, 粒度大, 双晶显著, 脉中有少量

粗粒具锍色黄铁矿存在(图 4C)。萤石为细粒集合体, 切割方解石脉或夹于方解石脉中央, 显示晚于碳酸盐形成。

3 成矿流体性质

为了弄清流体-岩石反应和金沉淀时的温度、压力及流体介质条件, 对前河矿区 16 件脉石英和蚀变岩样品开展了以石英为寄主矿物的流体包裹体研究。

3.1 流体包裹体类型及特征

前河金矿石英流体包裹体类型比较简单, 包裹体气相分数变化较大, 从 5%~70% 均有产出, 但以 10%~20% 的气相分数常见。这些包裹体成群出现, 分布杂乱, 具有相近气相分数和均一温度, 内部组成也较一致。包裹体个体较小, 差别不大, 多在 2~5 μm 之间, 个别达 20 μm ; 气液包裹体的直径较大, 而直径小的则主要为一些单相包裹体、含 CO_2 包裹体和少数气液包裹体。未发现含石盐或其他子矿物的高盐度包裹体。包裹体形态复杂多样, 有较规则的椭圆形、菱形、圆形和不甚规则的长条形、曲管形、三角形等(图 6)。本次研究对象均为原生包裹体, 根据室温下包裹体存在的相态和成分, 可将研究区包裹体分为 4 种类型。

(1) 气体包裹体(V 型): 室温下多为单一气相, 少数由气液两相组成($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$), 但是气相总体积大于液相体积, 即充填度 $< 50\%$ 。在均一法测温时, 随着温度的升高气泡体积逐渐扩大, 最后均一到

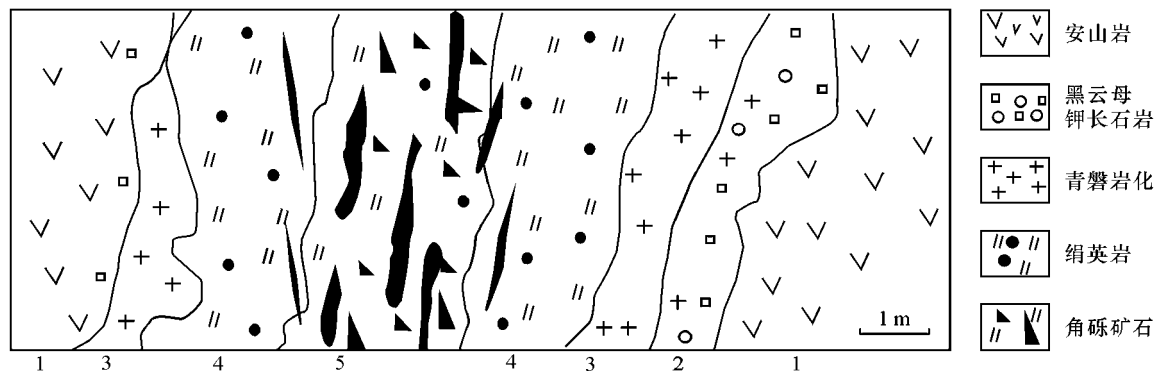


图 5 前河金矿床围岩蚀变分带示意图

1—弱蚀变安山岩; 2—钾长石黑云母化带; 3—青磐岩化带; 4—绢英岩化带; 5—黄铁矿绢英岩化带

Fig. 5 Schematic geological map of the wall rock alteration zone in the Qianhe gold deposit

1—Weakly altered andesite; 2—K-feldspathization-biotitization belt; 3—Propylitization belt; 4—Phyllic alteration belt; 5—Pyritization-sericitization belt

表 1 前河金矿床热液成矿期及主要矿物生成顺序

Table 1 Formation and paragenetic alteration sequence of main minerals in the Qianhe gold deposit

矿物名称	黄铁矿-石英阶段 (成矿前期 I)	石英-黄铁矿阶段 (主成矿期 II)	碳酸盐-卤化物阶段 (成矿期后 III)
钾长石	————	-----	
黑云母	————		
金红石	-----		
钠长石	---		
绿泥石	————	-----	————
绿帘石	————	---	————
绢云母	-----	————	
石英	————	————	-----
磁黄铁矿		-----	
黄铁矿	-----	————	-----
自然金		————	
银金矿		---	
方铅矿		-----	
黄铜矿		---	
闪锌矿		---	
阳起石			---
萤石			-----
方解石		-----	————
斑铜矿			-----

气相。该类包裹体较少,通常呈寄主矿物的椭圆形,孤立状分布,属原生包裹体,大小一般 2~5 μm,包裹体气相部分呈暗棕色。

(2)气液包裹体(V-L 型):室温下由液+气两相组成(L_{H₂O}+V_{H₂O}),气相分数 10%~50%,数量不多,多呈椭圆形,少部分呈不规则状,个体相差较大,个体大者可达 8~15μm。

(3)液体包裹体(L 型):室温下由液+气两相组成(L_{H₂O}+V_{H₂O}),但是液相总体积大于气相体积,气相分数多在 5%~10%。在均一法测温度时,随着温度的升高气泡逐渐缩小,最后均一到液相。该类包裹体在矿区分布较多,呈椭圆形或不规则形,个体较小,一般为 3~6 μm。

(4)含 CO₂ 三相包裹体(C 型):该类型包裹体较少见,室温(25℃)下一般不出现液态 CO₂,只有在冷冻条件下才能将其与气液包裹体区分开来。

3.2 显微测温

流体包裹体显微测温工作在中国地质大学(北京)流体包裹体实验室进行,使用仪器为英国产 Link THM600 冷热台。均一温度重现误差小于 2℃,开始的升温速度在 10℃/min,在气液两相接近均一时,降低升温速度,将其控制在 1℃/min,并及时记录均一温度。

各成矿阶段石英中各类型包裹体均一温度列于表 2 和图 7 中。可以看出均一温度分为 3 个区间:即 278~331℃,213~260℃和 145~192℃。

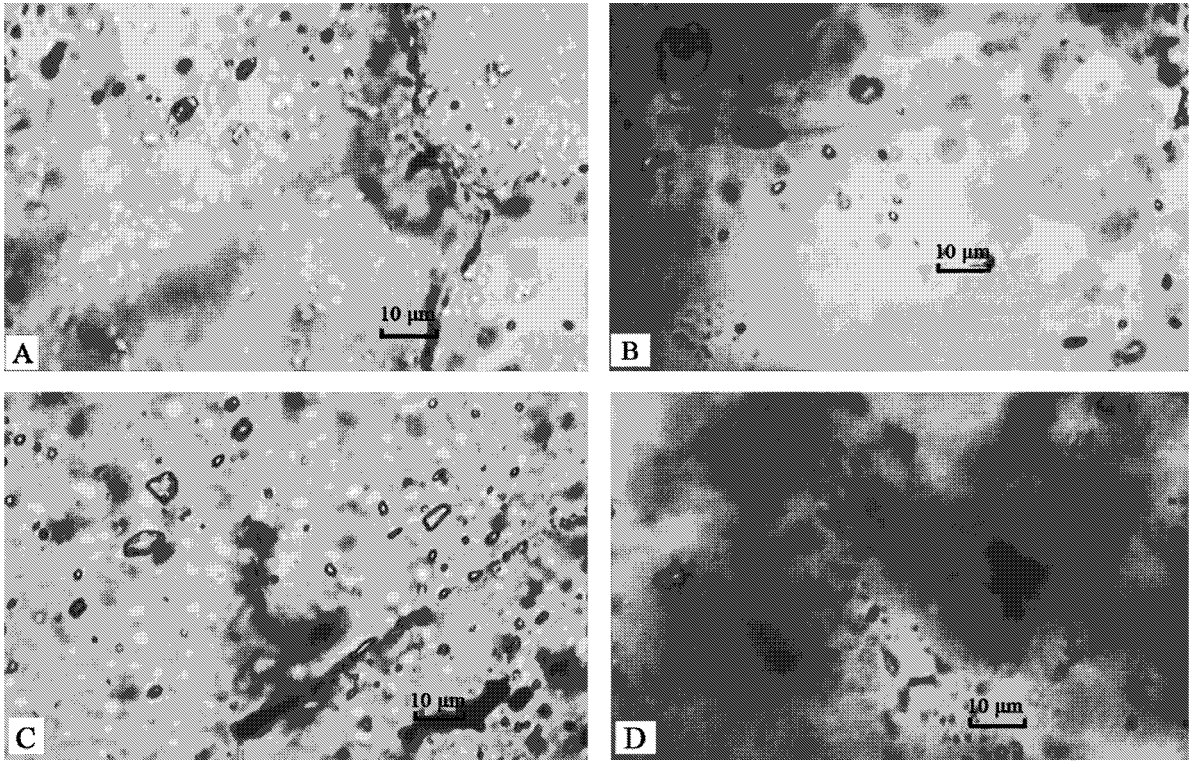


图 6 前河金矿区石英流体包裹体

A. 硅化过程中形成的石英脉,含 CO₂ 三相包裹体(C 型);B. 矿石石英,气液包裹体(V-L 型);C. 黄铁矿石英阶段的脉石英,液体包裹体(L 型);D. 黄铁绢英岩,气体包裹体(V 型)

Fig. 6 Fluid inclusions in quartz of the Qianhe gold deposit

A. Quartz vein formed in the silication process, containing CO₂ three phase inclusion (C type); B. Quartz in ore, vapor-liquid inclusion (V-L type); C. Quartz vein formed in the pyrite-quartz metallogenic stage, liquid inclusion (L type); D. Pyritized-sericitized andesite, vapor inclusion (V type)

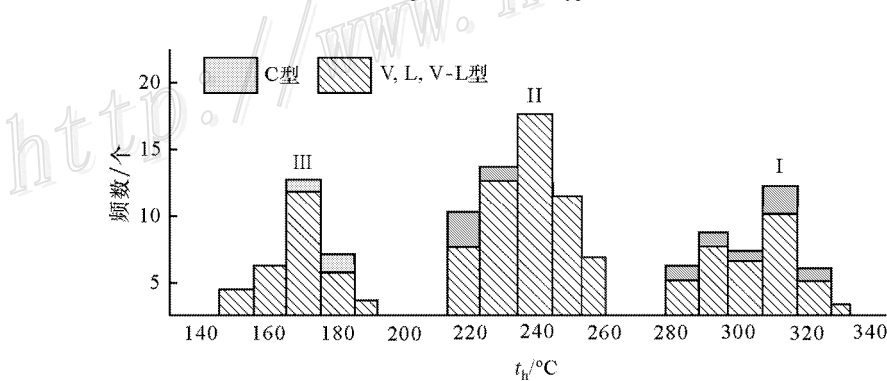


图 7 前河金矿流体包裹体均一温度直方图

Fig. 7 Frequency histogram of microthermometric data of quartz fluid inclusions in the Qianhe gold deposit

冷冻测温时,利用对包裹体降温,在温度下降过程中观察包裹体的变化,包裹体冻结后,缓慢升温,至冰晶刚刚熔化,记录冰点温度。根据所测冰点温度与换算表(卢焕章等, 2004),得到流体包裹体的盐度值(表 2)。利用均一温度和盐度,根据公式计算包裹体的密度和压力(刘斌等,1999),本区成矿流体的密度变

化范围是 0.68~0.94 g/cm³,其中高温流体密度为 0.68~0.76 g/cm³,中温流体为 0.80~0.89 g/cm³,低温流体为 0.90~0.94 g/cm³; 3 个成矿阶段压力分别为 (576.88~896.55) × 10⁵Pa、(502.86~710.57) × 10⁵Pa 和 (367.01~518.78) × 10⁵Pa。

由均一温度直方图(图7)可知,含 CO₂ 包裹体

表 2 前河金矿流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of quartz fluid inclusions in the Qianhe gold deposit

标高/m	勘探线	成矿阶段	个数	类型	$t_{\text{H}}/^{\circ}\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$p/\times 10^5\text{Pa}$
200	78	I	7	V-L	281~312	1.9~4.3	0.73~0.76	688.20~827.56
			8	L				
200	80	Ⅲ	9	L	145~185	2.5~5.2	0.92~0.94	367.06~496.50
			13	V-L				
200	81	I	13	V-L	291~323	3.4~5.9	0.73~0.76	758.41~872.75
			6	V				
200	82	Ⅱ	6	V-L	223~245	2.3~6.2	0.85~0.86	559.29~663.61
			4	V				
200	84	Ⅲ	8	L	161~192	3.4~5.9	0.92~0.93	419.60~518.78
			9	V-L				
240	75	I	11	V-L	285~309	0.71~1.9	0.71~0.74	576.88~756.77
			2	C				
240	76	Ⅱ	12	-L	241~255	1.8~4.9	0.82~0.83	585.88~682.00
			7	L				
240	81	I	7	V-L	279~321	0.9~1.8	0.68~0.75	598.16~780.36
			4	L				
280	75	Ⅱ	12	V-L	231~258	5.2~7.8	0.85~0.87	619.96~705.83
			6	L				
280	78.5	I	5	C	301~331	5.1~6.2	0.72~0.76	806.92~896.55
			11	V-L				
320	81	Ⅱ	13	V-L	213~254	3.1~5.4	0.84~0.87	550.72~683.12
			4	V				
360	82	Ⅱ	6	C	234~256	1.1~1.8	0.80~0.83	523.55~622.34
			12	V-L				
400	81	Ⅱ	9	V-L	225~260	6.9~7.6	0.85~0.89	612.44~710.57
			3	L				
440	83	Ⅱ	15	V-L	221~249	1.2~6.9	.84~0.86	502.86~677.77
480	80.5	I	8	V-L	290~326	0.7~2.6	0.68~0.73	584.84~828.67
			9	C				
480	84	Ⅲ	12	V	158~192	2.2~2.6	0.90~0.93	394.21~488.05
			6	C				

的均一温度主要集中在中-高温区,部分含 CO₂ 包裹体由于充填度过小(<40%),在升温至完全均一前气泡就已破裂,故无法获得均一温度数据。镜下同期次而不同 CO₂ 相比比例的包裹体均一温度相近,说明成矿流体会发生了不混溶(卢焕章等,2004)。由于本区含 CO₂ 包裹体数量少而且个体较小($\varphi\leq 10\mu\text{m}$),所以未测得 CO₂ 部分均一温度和‘笼合物’的融化温度。

3.3 包裹体成分分析

为了进一步了解本矿区 3 个阶段矿化过程的流体特征,利用群体包裹体的分析方法,测定了石英中流体包裹体气、液相成分(表 3)。

将分步碎至 40~60 目的石英样品经过清洗-粗选-电磁选-人工挑选等步骤获得纯度大于 98% 的石英颗粒。为消除与石英共生的硫化物连晶,将石英

单矿物置入 60~80℃ 的稀硝酸溶液浸泡 12 h,然后用去离子水冲洗,并以超声波离心仪清除杂质,重复去离子水冲洗和超声波离心处理 6 次,直至 WFX-110 原子吸收光谱仪显示淋液不含离子,最后烘干得到可供分析的石英单矿物样品。流体包裹体的气、液相成分分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行。

Cl⁻ 的含量在Ⅱ阶段显著降低,到Ⅲ阶段又急剧上升,而 SO₄²⁻ 含量在Ⅰ、Ⅱ阶段大于 Cl⁻,是高硫型矿体在地表氧化环境的反映,与包裹体的温压所反映的浅成低温热液矿床成矿流体类型相一致(Wilkinson, 2001)。各阶段的 Na⁺、Ca²⁺ 含量远大于 K⁺ 和 Mg²⁺,Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 等 4 种离子的含量在Ⅱ阶段有下降的趋势。阴离子含量在Ⅱ阶段显著增加,是阳离子含量的 16 倍之多。

表 3 前河金矿石英流体包裹体气、液相成分分析
Table 3 Vapor and liquid component analyses of quartz fluid inclusions in the Qianhe gold deposit

样号	成矿阶段	x (气相成分)/%							
		H ₂ O	CH ₄	N ₂	C ₂ H ₆	H ₂ S	Ar	CO ₂	Σ/H ₂ O*
20081	I	97.572	0.361	0	0.457	0.033	0	1.577	0.0249
24081	I	88.57	0.07834	3.838	0.0614	0.01199	0.02884	7.572	0.131
28075	II	95.797	0.359	0	0.358	0.251	0.054	3.181	0.0439
40081	II	88.78	0.111	4.169	0.0932	0.01203	0.04341	6.393	0.122
20082	II	80.21	0.114	5.202	0.1082	0.02094	0.02406	15.456	0.261
24076	II	80.443	1.183	0	7.112	0.277	0.361	10.624	0.243
48084	III	97	0.03435	1.105	0.02048	0.00221	0.01329	1.756	0.0302

样号	成矿阶段	液相成分/(μg·g ⁻¹)							
		F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	(Σ-/Σ)***
20081	I	0	5.97	26.4	7.98	0.6	0.177	2.53	2.868
24081	I	0	2	10.388	2.589	0.231	0	0.899	3.331
28075	II	0	2.57	8.58	3	0.528	0.072	0.801	2.534
40081	II	0	9.15	6.78	5.55	0.405	0	2.22	1.949
20082	II	0	2.15	33	5.13	1.81	0	0	5.065
24076	II	0	0.435	9.51	0.185	0	0	0	53.757
48084	III	0	27	4.17	21	0.405	0	4.23	1.216

样号	成矿阶段	气体逸度					pH	E _h
		lgf(O ₂)	lgf(CH ₄)	lgf(H ₂ O)	lgf(CO ₂)	lgf(H ₂ S)		
20081	I	-31.73	-0.41	1.143	0.099	-1.777	5.689	-0.395
24081	I	-31.5	-1.081	1.2	0.788	-2.183	5.3	-0.36
28075	II	-36.23	-0.448	0.947	0.339	-0.971	4.837	-0.318
40081	II	-36.02	-0.959	0.902	0.639	-2.295	4.675	-0.304
20082	II	-36.58	-0.952	0.878	1.021	-2.048	4.429	-0.281
24076	II	-35.97	0.072	0.94	0.876	-0.904	4.597	-0.297
48084	III	-42.42	-1.506	0.831	0.029	-3.065	4.483	-0.286

注：* 为 (CH₄ + N₂ + C₂H₆ + H₂S + Ar + CO₂)/H₂O,单位为 1；* 为 (F⁻ + Cl⁻ + SO₄²⁻)/(Na⁺ + K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺),单位为 1；气和液相成分分析的重复测试精度<5%。测试人 朱和平。

在气相成分中,Ⅱ阶段的 CO₂/H₂O 明显高于Ⅰ、Ⅲ阶段,CO₂、N₂ 和 H₂S 在第Ⅱ阶段富集,表现为 f(CO₂), f(H₂S) 和 f(CH₄) 在Ⅱ阶段增大,这体现了这些挥发性组分的加入有利于金的搬运和沉淀(李胜荣等,1991;1995)。

从成矿早到晚期,f(O₂)、f(H₂O) 逐渐减小,pH 值减小,E_h 值增大,表明成矿溶液为弱酸性、弱还原性,并在中晚期增强。

4 讨 论

4.1 成矿物质与成矿流体来源及金的搬运形式

本区变质岩基底构造层金的背景值较高,特别是古老的褶皱基底太华群变超镁铁质-镁铁质岩石构成金矿化的重要物质基础。尽管各个学者所测岩

石含金性不同,对矿床成因的认识各异(变质热液或岩浆热液),但对金质主要来源于太华群的认识是一致的。范宏瑞等(1994)认为,由于熊耳群未遭受区域变质作用和混合岩化作用,缺少使金发生大规模活化转移的条件,因而熊耳群不是本区金矿的主要矿源层。马振东(1990)根据区域构造、岩浆活动及金源层特征,总结出本区的成矿地质-地球化学模式为:太古宙或中元古代富金的岩层在燕山晚期壳源岩浆作用过程中活化转移,然后在中元古界的韧性糜棱岩化剪切带的张性期沉淀成矿,形成构造蚀变岩型金矿床。

测得前河金矿化早阶段线性蚀变形成的钾长石³⁹Ar-⁴⁰Ar 快中子活化法的同位素坪年龄为(142.2±0.8) Ma,等时线年龄为(143.1±1.8) Ma^①。它反映的是围岩蚀变的年龄,并可能受到原岩熊耳群物

① 卿 敏,等. 2001. 河南省嵩县前河金矿区外围物化探找矿预测研究. 内部资料.

质的影响而偏高。该值至少说明矿区的成矿蚀变与熊耳群火山热液活动无明显的关系,而本区在 200 Ma 以后发生的大的构造-热事件只有燕山期花岗岩浆活动,这表明前河金矿的成矿与燕山期花岗岩浆的侵入有成因联系。

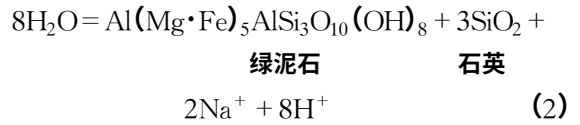
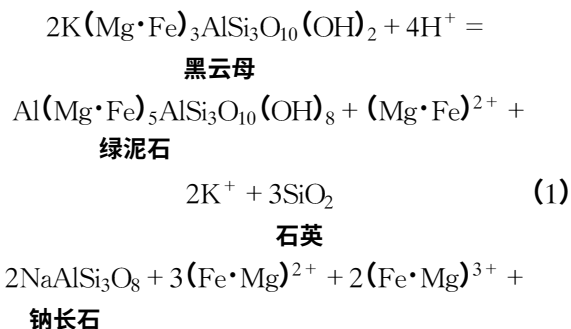
稳定同位素特征表明,前河金矿早期成矿热液基本上位于岩浆水范畴,仅 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 略有偏差,可能反映成矿流体以岩浆水为主,并有大气降水的混合,反映成矿物质主要由深源岩浆提供,而浅部物质参与作用也较明显(李莉等, 1999)。因此,前河金矿的成矿热液不是典型的岩浆热液,而是受古大气水混杂的含矿流体。在成矿第一阶段,含矿热液即受到古大气水的混合,并随着热液的演化,在主成矿阶段混合程度加大,使得热液的氢、氧同位素组成发生进一步漂移。

本区流体盐度低,处于弱还原环境。已有的热力学资料表明,中低温条件下金以 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 、 $\text{HAu}(\text{HS})_2^0$ 、 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 等形式迁移,而在大于 400℃ 以上的条件下 Au-Cl 络合物对金迁移有利(胡芳芳等, 2005)。所以,本区 Au 应是以 Au-S 络合物的形式搬运的。 CO_2 具有弱酸性,可以调节流体的 pH 值使其保持在 Au-S 络合物稳定存在的范围内,从而提高金的溶解度;当流体与围岩发生反应时, CO_2 还能促使金短时间内在较窄的空间范围发生沉淀(Phillips et al., 2004),这与本区硅化安山岩和矿石石英中较高的 $f(\text{CO}_2)$ 相符合。

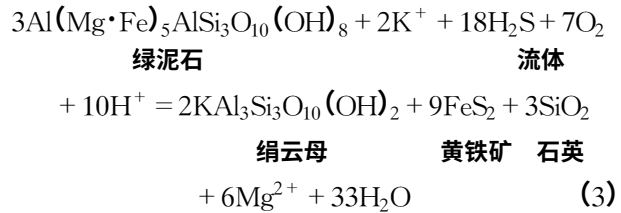
4.2 流体-岩石反应与金的沉淀成矿

含矿热液在沿构造带迁移过程中,由于流体-围岩间强烈的化学和热力学不平衡导致了强烈的围岩蚀变(流体-岩石反应)。下面对主成矿阶段发生的蚀变反应进行说明。

区内广泛发育绿泥石化,黑云母、角闪石等暗色矿物在流体作用下发生分解。在交代蚀变过程中,绿泥石沿黑云母的边缘、解理和中心进行交代,并可保持黑云母的假象,其次是钠长石斑晶被交代。

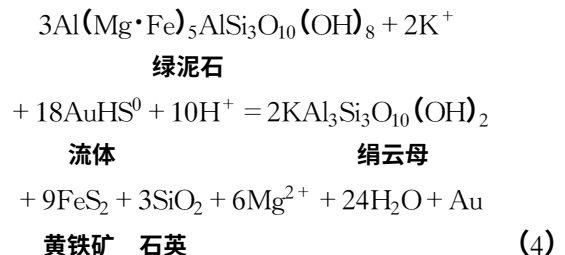


在中等温度, K^+ 活度降低或酸度升高的条件下,成矿热液就会使绿泥石继续分解,使青磐岩化安山岩被石英和绢云母所交代。在交代初期,常是含 Ca、Fe 和 Mg 的矿物先被交代,在热液的进一步作用下,石英斑晶或石英可扩大再生长,形成变斑晶,包裹并可交代绢云母。



由于温度降低,使 H_2S 和 CO_2 在水中的溶解度增加,导致 pH 值降低和 E_h 的升高,使 S^{2-} 形成 S_2^{2-} ,这种环境适宜黄铁矿的形成。在本矿床中,出现黄铁矿绢英岩的地段矿化一般较好。

流体-岩石反应是逐级进行的,这个过程可以在前河金矿流体运移通道周围的蚀变分带上得到反映。流体与围岩的反应不但改变了原岩的成分,而且也改变了流体自身的成分和物理化学性质。由于成矿流体中 H_2S 的消耗,流体中硫活度降低,从而造成热液中搬运金的硫化氢络合物不稳定,金沉淀成矿(Ken et al., 2001),这可能是前河金矿金与黄铁矿密切共生的原因:



钾长石化带构成 Au 及其主成矿元素 Ag、Cu、Pb 和 Zn 突出的低含量带,青磐岩化带中 Cu 和 Zn 已高度富集,而硅化安山岩中, Pb 的含量便较之原岩有数倍乃至数百倍的增长(曹焱, 2007)。由此可知,在高氧逸度、碱性条件下发生红化,其作用主要是将封闭在黑云母和长石中的 Au 和 Ag、Cu、Pb、Zn 等调动起来,随热液迁移并参与成矿(李胜荣等, 1993)。绢英岩化早期既是上述过程的继续,但由于氧逸度有所下降,因而也是 Au 由氧化到还原的开始。特别是到黄铁绢英岩化阶段和硅化阶段,介质基本处于还原环境,在

金与其他成矿元素活化沉淀的动态平衡反应中, 沉淀便成为主导的过程(樊文苓, 1995 汪玉荣, 2000)。

5 结 论

(1) 前河金矿区的脉石英、硅化安山岩和矿石石英中含有 4 种类型的流体包裹体。均一温度的范围为 $145 \sim 331^{\circ}\text{C}$, 其中含 CO_2 包裹体的完全均一温度主要分布在中-高温区。成矿流体的密度和压力变化范围分别是 $0.68 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$ 和 $(367.01 \sim 896.55) \times 10^5 \text{ Pa}$, 尽管在 $278 \sim 331^{\circ}\text{C}$ 和 $(576.88 \sim 896.55) \times 10^5 \text{ Pa}$ 的条件下就已经发生了流体-岩石反应(成矿第一阶段), 但金大量沉淀成矿的温度和压力范围分别为 $213 \sim 260^{\circ}\text{C}$ 和 $(502.86 \sim 710.57) \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(2) 流体中金属阳离子以 Na^+ 为主, 其次是 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} , 含量 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 。流体阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主, 未检测出 F^- 。 Na^+ 和 Cl^- 在晚阶段成矿流体中的含量远大于其他各离子, 表明在成矿后期流体中盐度有增高的趋势。在气相成分中, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值明显增高, N_2 、 H_2S 、 Ar 和 C_2H_6 等挥发性组分在主成矿阶段的加入亦有利于金的搬运和沉淀。从成矿早期到晚期, $f(\text{O}_2)$ 、 $f(\text{H}_2\text{O})$ 呈减小的趋势, $f(\text{CO}_2)$ 、 $f(\text{H}_2\text{S})$ 和 $f(\text{CH}_4)$ 在主成矿阶段均有增大的表现但不显著, pH 在 $4 \sim 6$ 之间, $E_h < 0$, 从成矿早期到晚期 pH 值减小, 而 E_h 值增大, 表明成矿溶液为弱酸性、弱还原性, 并在中晚期增强。

(3) 在区域上广泛发生安山岩青磐岩化的基础上发生的流体-岩石反应是造成本矿床金沉淀成矿最主要的原因。

志 谢 本文得到河南省嵩县前河矿业有限公司专项科研经费的支持, 野外工作中, 得到总经理苗新华, 副总经理李日旺、张奇和地测处同仁的大力支持, 谨此致以诚挚的谢意。感谢中国地质大学(北京)流体包裹体实验室的诸慧燕老师和张文淮老师在包裹体测温过程中给予的指导和帮助。

References

Ba A M, Ma H Y, Zhang S S and Tian X Q. 2006. Ore characteristics and ore-searching direction of Qianhe gold mine in Singxian County, Henan Province[J]. Contribution to Geology and Mineral Resources, 21(2): 100-114 (in Chinese with English abstract).
Cao Ye. 2007. Mineral geochemistry and deep prediction of the Qianhe

gold mine in Henan(master candidate paper)[D]. Supervisor: Li S R. Beijing: China Univ. Geosci. 83p(in Chinese).

Chen Y J and Zhao Y C. 1997. Geochemical Characteristics and evolution of REE in the early Precambrian sediments: Evidences from the southern margin of the North China Craton[J]. Episodes, 20: 109-116.
Fan H R, Xie Y H, Zhao R and Wang Y L. 1994. Stable isotope geochemistry of rocks and gold deposit in the Xiong 'ershan area western Henan Province[J]. Contribution to Geology and Mineral Resources, 9(1): 54-64 (in Chinese with English abstract).
Fan H R, Xie Y H and Wang Y L. 1998. Fluid-rock interaction during mineralization of the Shanggong structure-controlled alteration-type gold deposit in western Henan Province, central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(4): 529-541 (in Chinese with English abstract).
Fan W L L, Wang S Y and Tian Y F. 1995. Experimental studies on the solubility and transport of gold in alkaline aqueous SiO_2 -rich solutions[J]. Acta Mineralogica Sinica, 15(2): 176-183 (in Chinese with English abstract).
Hu F F, Fan H R, Shen K, Zhai M G, Jin C W and Chen X S. 2005. Nature and evolution of ore-forming fluids in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1329-1338 (in Chinese with English abstract).
Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit[J]. Lithos, 55: 229-272.
Ken I H, Tohru M and Hisao S. 2001. Precipitation of gold in a low-sulfidation epithermal gold deposit insights from a submillimeter-scale oxygen isotope analysis of vein quartz[J]. Econ. Geol., 96: 211-216.
Li L, Qing M and Chen X. 1999. Geochemical features of Qianhe gold deposit, Henan[J]. Gold Geol., 5(3): 75-80 (in Chinese with English abstract).
Li S R and Shao K Z. 1991. The typomorphology of fluid inclusions in quartz from Qiyugou gold deposit[J]. Geosci., 5(4): 415-422 (in Chinese with English abstract).
Li S R, Chen G Y, Shao W and Sun D S. 1993. Genetic mineralogy of Rushan gold deposit in Jiaodong Peninsula [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 65-78 (in Chinese with English abstract).
Li S R. 1994. On the affinity of Mesozoic calc-alkaline granitoids in the Luoning-Songxian area, western Henan Province[J]. Geol. Rev., 40(6): 489-493 (in Chinese with English abstract).
Li S R. 1995. A metallogenic series of crypto-explosive breccia type-dominated gold deposit[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 4(5): 271-277 (in Chinese with English abstract).
Li Y F, Mao J W and Hu H, Bai F J, Li H M, Li M W, Guo B J and Ye H S. 2005. The fluid inclusions and their He-Ar-S-H-O isotopic compositions and tracing to the source of ore-forming fluids for Gongyu gold deposit, Western Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1347-1358 (in Chinese with English abstract).
Liu B and Shen K. Thermodynamics of fluid inclusion [M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).

- Liu H Y, Hu S X and Zhou S Z. 1998. A study of rock-controlling and ore-controlling role of the Machaoying fault in western Henan Province[J]. Mineral Deposits, 17(1): 70-81 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R and Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusion[M]. Beijing: Sci. Press (in Chinese with English abstract).
- Luo M J, Li S M and Lu X X. 2000. Metallogenic series of main ore deposit and metallogeny in Henan Province[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Ma Z D. 1990. Regional geochemistry of gold and molybdenum of two metallogenic series in the southern margin of North China platform, collected works of regional geochemistry of Qinba area [M]. Wuhan: China Univ. Geosci. Press (in Chinese with English abstract).
- Pei Y H, Yan H Q and Zhang M Y. 2006. Rock and mineral characteristics of Qianhe gold deposit in Henan [J]. Mineral Resources & Geology, 20(4-5): 513-518 (in Chinese with English abstract).
- Phillips G N and Evans K A. 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposit[J]. Nature, 429: 860-863.
- Wang Y R and Hu S X. 2000. Study on gold remobilization in process of potassium metasomatic alteration: Taking gold deposit in the North China platform as example [J]. Science in China (Series D), 30(5): 499-509 (in Chinese).
- Yan J S, Pang Z S and Yue Z S. 2005. Tectonic character and gold metallogeny in the Machaoying fault zone [M]. Henan: Yellow River Water Resources Press (in Chinese with English abstract).
- Yuan H G and Pei Y H. 1997. The characteristics of the wall rock and host rock of the orthophyric tectonic altered rock-type gold deposit in Qianhe area [J]. Henan Geol., 15(1): 24-28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y H, Zhang S H, Han Y G and Zhang H J. 2006. Strik-slip features of the Machaoying fault zone and its evolution in the Huaxiong terrane, Southern North China craton [J]. J. Jilin Univ. (Earth Science Edition), 36(2): 169-176 (in Chinese with English abstract).
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京: 地震出版社.
- 樊文苓, 王声远, 田弋夫. 1995. 金在碱性富硅热液中溶解和迁移的实验研究 [J]. 矿物学报, 15(2): 176-183.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 1998. 豫西上官构造蚀变岩型金矿成矿过程中的流体-岩石反应 [J]. 岩石学报, 14(4): 529-541.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 赵 瑞, 王英兰. 1994. 豫西熊耳山地区岩石和金矿床稳定同位素地球化学研究 [J]. 地质找矿论丛, 9(1): 54-64.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 沈 昆, 翟明国, 金成伟, 陈绪松. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化 [J]. 岩石学报, 21(5): 1329-1338.
- 李 莉, 卿 敏, 陈 祥. 1999. 河南前河金矿床地球化学特征 [J]. 黄金地质, 5(3): 75-80.
- 李胜荣, 陈光远, 邵 伟. 1993. 胶东乳山金矿田成因矿物学 [M]. 北京: 地质出版社. 65-78.
- 李胜荣, 邵克忠. 1991. 河南嵩县祁雨沟金矿床石英流体包裹体标型 [J]. 现代地质, 5(4): 415-422.
- 李胜荣. 1994. 论豫西洛宁-嵩县中生代该碱性花岗岩类的同源性 [J]. 地质评论, 40(6): 489-493.
- 李胜荣. 1995. 以隐爆角砾岩为主的金矿系列模式 [J]. 有色金属矿产与勘查, 4(5): 271-277.
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 白凤军, 李厚民, 李蒙文, 郭保健, 叶会寿. 2005. 豫西公峪金矿床流体包裹体及其 He, Ar, S, H, O 同位素组成对成矿流体来源的示踪 [J]. 岩石学报, 21(5): 1347-1358.
- 刘 斌, 沈 昆. 1999. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社.
- 刘红缨, 胡受奚, 周顺之. 1998. 豫西马超营断裂带的控岩控矿作用研究 [J]. 矿床地质, 17(1): 70-81.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 欧光习, 沈 昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社.
- 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥. 2000. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列 [M]. 北京: 地质出版社.
- 马振东. 1990. 华北地台南缘金和钼两个成矿系列的区域地球化学研究, 秦巴区域地球化学文集 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 裴玉华, 严海麒, 张明云. 2006. 河南前河金矿岩石矿物特征 [J]. 矿产与地质, 20(4-5): 513-518.
- 王玉荣, 胡受奚. 2000. 钾交代蚀变过程中金活化转移实验研究——以华北地台金矿为例 [J]. 中国科学(D 辑), 30(5): 499-509.
- 燕建设, 庞振山, 岳铮生, 等. 2005. 马超营断裂带构造特征及金矿成矿研究 [M]. 河南: 黄河水利出版社.
- 袁鹤皋, 裴玉华. 1997. 前河地区正长斑岩构造蚀变岩型金矿围岩及容矿岩石特征 [J]. 河南地质, 15(1): 24-28.
- 张元厚, 张世红, 韩以贵, 张慧军. 2006. 华熊地块马超营断裂走滑特征及演化 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(2): 169-176.

附中文参考文献

- 巴安民, 马红义, 张松盛, 田修后. 2006. 河南省嵩县前河金矿矿床地质特征和找矿方向 [J]. 地质找矿论丛, 21(2): 100-114.
- 曹 烨. 2007. 河南前河金矿矿物地球化学与深部预测 (硕士论文) [D]. 导师: 李胜荣. 北京: 中国地质大学. 98 页.