

文章编号: 0258-7106 (2000) 03-0235-10

山东蓬家乔金矿床成矿流体地球化学特征

杨金中 沈远超 刘铁兵 曾庆栋 邹为雷

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

提 要: 胶东地区存在 3 种类型的金矿床, 蚀变岩型(焦家式)和石英脉型(玲珑式)已经广为重视。最近在胶莱盆地的东北缘发现了一种新型金矿床——层控型金矿床, 以蓬家乔金矿床和宋家沟金矿床为代表。蓬家乔金矿床赋存在胶莱盆地东北缘拆离断层带中, 产于莱阳组砾岩与荆山群地层的构造接触部位, 是在燕山期火山-岩浆活动期间在大气水和岩浆水的参与下形成的。围岩遭受了强烈的硅化、绢云母化、碳酸盐化和黄铁矿化等蚀变作用。单个矿体最大长度 800 m, 宽度在 500~700 m 之间, 金品位 $(1 \sim 43) \times 10^{-6}$ 。矿石中流体包裹体发育, 主要为气液相 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 包裹体以及少量的含液相 CO_2 的 $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体。成矿热液气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主; 液相成分中富 Na^+ 、 Cl^- , 贫 K^+ 、 F^- ; f_{O_2} 为 $8.9 \times 10^{-40} \sim 5.9 \times 10^{-40} \text{ Pa}$; 氧化还原位为 0.46~0.52 eV, 为弱还原环境。成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 0.6‰~4.0‰, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -90‰~-98‰, 反映出成矿流体由大气水和岩浆水混合组成的特点。流体混溶、水-岩反应和古大气水的混入是造成蓬家乔金矿床流体化学组成变化、金沉淀成矿的主要因素。

关键词: 流体包裹体 成矿流体 地球化学 蓬家乔金矿床 山东

中图法分类号: P595

文章标识码: A

近年来, 随着胶莱盆地东北缘的盆缘拆离断裂带附近蓬家乔金矿、宋家沟金矿的预测和勘探成功, 胶莱盆地及其周边地区正在成为胶东乃至我国金矿床研究的热点地区。蓬家乔金矿位于山东省乳山市崖子镇山西村—东井口村之间, 大地构造位置上, 位于胶东地块、胶莱盆地东北缘。我们曾对该矿床地质、地球化学特征进行了重点研究, 取得了有关矿床成因、控矿因素等方面的初步认识^[1-3]。本文重点就蓬家乔金矿床的成矿流体地球化学特征进行研究, 探讨成矿流体的来源。

1 矿床地质概况

蓬家乔金矿处于胶东地块东部桃村-即墨断裂与午极-海阳断裂之间, 位于胶莱盆地东北边缘^[1-4]。出露地层主要有下元古界荆山群, 中生界莱阳组、青山组、王氏组和第四系等。区内岩浆岩主要为中生代花岗岩及各类脉岩, 邻近岩体有鹊山花岗岩体、昆嵛山片麻状二长花岗岩岩体。脉岩主要有闪长岩、闪长玢岩、煌斑岩、花岗斑岩等。

沿莱阳组砾岩与胶东群变质杂岩的构造接触部位, 发育一系列 EW 向产出的拆离断层,

基金项目: 中国科学院创新工程项目 KZCX1-Y-03 和中国科学院黄金九五重大项目 KZ951-A1-404-02-02 专题资助

第一作者简介: 杨金中 (1970—), 男, 博士生, 主要从事矿床学与岩石大地构造学研究

收稿日期: 1999-12-08; 修订日期: 2000-04-07

蓬家乔金矿即赋存其中(图1)。该构造带呈一向南凸出的弧形,以8线为界,其西为 290° 左右,倾向SW,其东为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$,倾向SE,倾角 $5^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。宽度在60~730 m之间,控制长度4 km,主要沿含石墨长英质片岩、片麻岩、硅化大理岩发育。蓬家乔金矿主要为含金黄铁矿化、硅化构造角砾岩型,金矿化严格受此拆离断层控制,拆离断裂带即为金矿化蚀变带。断裂带上盘为莱阳组砾岩及部分胶东群岩性层,下盘为糜棱岩化变质岩,见有闪长岩、煌斑岩等岩脉,走向NE、倾向NW,少数SW,倾角 $39^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。

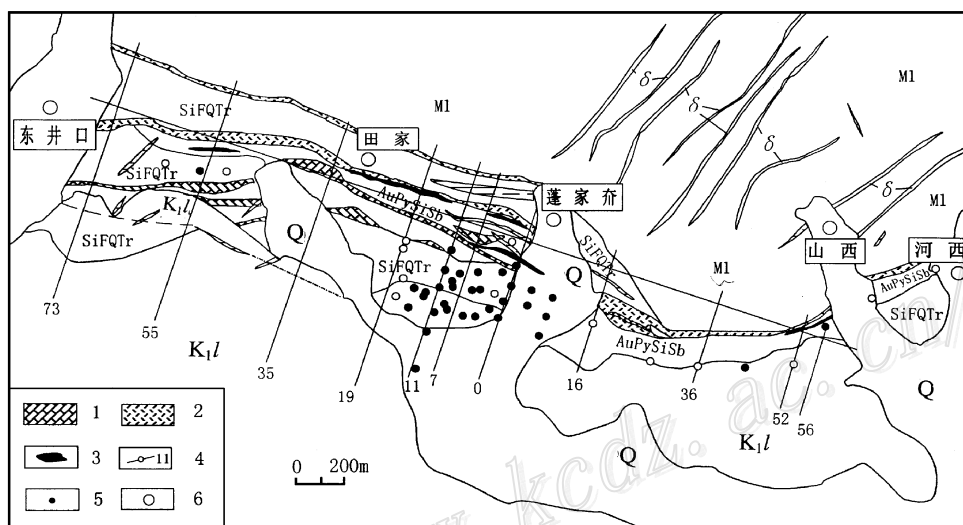


图1 蓬家乔金矿床矿区地质简图

Q—第四系; K_1l —莱阳组砾岩; SiFQTr—硅化长英质碎裂岩; AuPySiSb—含金黄铁矿化硅化角砾岩; M1—糜棱岩; δ —闪长玢岩; 1—大理岩; 2—闪长岩; 3—金矿体; 4—勘探线及编号; 5—钻孔; 6—村庄

Fig. 1. Geological sketch map of the pengjiakuang gold deposit.

Q—Quaternary; K_1l —Conglomerate of Laiyang Formation; SiFQTr—Silicified felsic cataclastite; AuPySiSb—Auriferous pyritized silicified breccia; M1—Mylonite; δ —Diorite porphyrite; 1—Marble; 2—Diorite; 3—Gold orebody; 4—Exploration line and serial number; 5—Drill hole; 6—Village.

金矿体呈透镜状、板状以及石英小脉和细脉等形态,但从总体上看,无论在平面上还是在剖面上均呈透镜体状,具明显的膨缩现象^[1~3]。含矿层在矿区范围内存在3个较大的膨大区,由西向东依次为东井口矿区(31~75线)、田家矿区(23~16线)、山西矿区(44~72线),最大宽度分别达到280 m、225 m、110 m。区内已发现的3个矿体及数十个矿化异常点均位于这些膨大区内。其中,Ⅰ号矿体分布于6~15线间,走向 290° ,倾向SW,倾角 $15^{\circ}\sim 50^{\circ}$,控制500 m,延深达50 m以下,最大深度150 m,最大厚度46 m,最小厚度14~15 m,平均厚度30 m。最高品位43.04 g/t(QJ14),平均品位3.25 g/t。Ⅱ号矿体在1~16线间断续分布,位于Ⅰ号矿体的下盘,长度>1 000 m,走向 290° ,倾向SW,倾角上陡下缓,在30~15线间,控制最大倾斜延深大于180 m,深度大于55 m,平均厚度1 m左右,金品位2.01~9.1 g/t。Ⅲ号矿体分布在46~80线间,位于Ⅰ号矿体的上盘,断续延长约800 m,走向 60°

左右, 倾向SE, 倾角上陡下缓, 厚度在8 m以上, 金品位2.45~6.9 g/t, 矿石中含Pb、Zn。矿石具有半自形—自形结构、碎裂结构、充填结构和包含结构, 角砾状、块状、浸染状、网脉状或条带状构造。矿石矿物成分非常复杂, 其中金属矿物主要有黄铁矿、银金矿, 次要矿物有磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等; 非金属矿物有石英、绿泥石、方解石、绢云母、斜长石、钾长石、白云石和重晶石等。

矿体围岩蚀变发育, 主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化等。自地表至地下深部, 围岩蚀变具有一定的分带性: 地表为泥化、碳酸盐化→拆离构造带的绢云母化、硅化、碳酸盐化、泥化→下盘糜棱岩的硅化、局部钾长石化和钠长石化。对地表泥化带进行的X衍射分析研究认为, 泥化带主要由伊利石、石英、方解石和铁锰的碳酸盐组成^[5]。

蓬家乔金矿具有多期多阶段性的矿化蚀变特征。根据矿石的矿物组合及矿脉穿插关系, 可将矿区内的矿化蚀变期从早到晚划分为3个阶段。第一阶段包括两个亚阶段: 早阶段沿破碎带及两侧围岩发生面型特征的碳酸盐化、绢云母化和局部的硅化、绿泥石化和黄铁矿化; 深部岩石发生较强的钾长石化和局部的钠长石化。该阶段的各种蚀变矿物粒度较小。晚阶段表现为在前一阶段蚀变的基础上, 在破碎带内和碳酸盐化的基性岩石(如闪斜煌斑岩等)中出现浸染状粗粒黄铁矿, 同时伴随强烈的碳酸盐化和硅化。破碎带中铁白云石和方解石呈网脉状和团块状产出。破碎带两侧小范围内发生黄铁绢英岩化。该阶段是金矿化的序幕, 矿化较差。第二阶段以硅化、碳酸盐化、绢云母化为代表, 伴随有黄铁矿、方铅矿、黄铜矿和黝铜矿等多金属蚀变。这些矿物多呈浸染状, 团块状分布在构造角砾岩中, 以线型为特征。此期黄铁绢英岩化非常强烈, 黄铁矿呈细粒和粉末状, 是金矿化的主要时期。第三阶段以穿切角砾状矿石的多金属矿化、呈网脉状的碳酸盐化为代表, 同时伴随着绿泥石化。该阶段产物主要是充填在硅化角砾的裂隙之中, 形成黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等细脉。

2 流体包裹体的一般特征及成矿温度

本区石英中的流体包裹体较为丰富, 但其类型比较单一, 主要为气液相NaCl-H₂O型(A类), 以及少量的含液相CO₂的NaCl-CO₂-H₂O型包裹体(B类), 未见到含子晶的多相NaCl-H₂O包裹体。

第一阶段(碳酸盐-黄铁矿-石英阶段)形成的脉石英中包裹体个体一般较大(5~10 μm), 以A类为主, 仅在矿体上部脉石英样品中有混杂分布的A类和B类包裹体, 并表现为共生性质。包裹体形态一般为椭圆形—不规则形。第二阶段(含金多金属硫化物阶段)形成的脉石英包裹体一般较小(3~7 μm), 也相对较少, 主要为A类包裹体。部分样品中见到B类含液相CO₂包裹体。包裹体形态为长条型—不规则形, 并有定向分布的特点。第三阶段(多金属硫化物-碳酸盐阶段)形成的石英-碳酸盐脉中的包裹体, 数量少且个体小, 为长条形—椭圆形, 皆为A类包裹体, 其气/液比值比前2个阶段形成的包裹体要小得多。

包裹体均一温度测量结果表明, 含液相CO₂的多相包裹体的均一温度较高, 为300~340℃, 气液相NaCl-H₂O型包裹体的均一温度一般为280~310℃。从总体上看, 流体包裹体的均一温度变化范围较宽, 多数在200~340℃, 少数可达到400℃左右; 从第一成矿阶段到第三成矿阶段, 均一温度逐渐下降。第一成矿阶段均一温度在280~400℃之间, 众数为340℃;

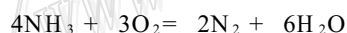
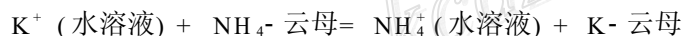
第二成矿阶段均一温度在 260~360 ℃ 之间, 众数为 310~320 ℃; 第三成矿阶段均一温度在 240~320 ℃ 之间, 众数为 280 ℃。

3 流体包裹体的气、液相成分

本次研究主要对 4 件蚀变岩样品开展了以石英为主矿物的流体包裹体气相成分研究, 将清洗纯净的样品用爆裂法打开包裹体, 进行离子色谱分析。由于成矿热液活动的叠加, 同一样品中可能不只有一期包裹体存在, 在进行气相成分测试研究时, 根据包裹体的爆裂曲线划分爆裂取样温度区间, 分别制样分析。测试仪器为 Varian-3400 气相色谱仪。分析样品均为经蒸馏水反复清洗处理后的 40~80 目石英。

3.1 气相成分

流体包裹体的气相成分见表 1。气相成分中除 H₂O 为主要组分外, CO₂ 含量也较高。与其它金矿相比 (如我国著名的东秦岭和胶东地区金矿床), 本矿床显著的特点是含有一定量的 N₂, 并含有少量 CO 和 CH₄ 等气体。石英中流体包裹体含有一定的 N₂ 是本矿床的显著特征之一。不少学者对变质作用及其有关的金矿床中流体包裹体内 N₂ 的来源进行了探讨^[12-13], 一般认为, 在成岩变质作用过程中氮可能是有机成因的, 它在层状硅酸盐和长石中以铵根离子 (NH₄⁺) 形式存在, 如在云母中替代 K⁺, 钠长石中替代 Na⁺。在后来的热液作用过程中, 由于水-岩反应, 发生了下列一系列反应生成 N₂:



结合蓬家乔金矿的矿体分布特征, 即富矿体主要产在石墨富集段或含碳量较高的层位, 显示在包裹体中 N₂ 和 CH₄ 含量增加的地段, 往往出现金矿 (化) 的富集。我们认为, 在成矿热液的传输过程中, 其与这些岩层发生如下的物质和能量交换, 使某些组分活化出来, 从而改变了溶液的组成, 导致矿质沉淀, 并生成 N₂ 和 CH₄^[6]。

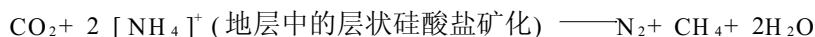
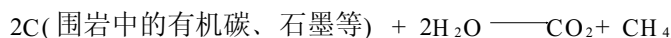


表 1 蓬家乔金矿石英包裹体气相成分表

Table 1. Gas composition of fluid inclusions from the Pengjiakuang gold deposit

样品号	阶段	N ₂	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	资料来源及单位
采-1		0.000	-	0.084	0.029	2.272	41.555	本文 单位: 10 ⁻⁶ mol/g
采-9		0.048	-	0.177	0.050	0.447	32.772	
采-10		0.000	-	0.242	0.038	0.784	42.789	
F-8		0.000	-	0.185	0.023	0.596	33.138	
Sun-1	成矿前期	2.19	0.022	-	0	58.72	343.76	[5] 单位: ml/100g
Sun-2	成矿主期	3.42	0.022	-	0	22.33	615.86	

3.2 液相成分

流体包裹体中液相成分以 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主, Ca^{2+} 次之, 不含 F^- 和 Mg^{2+} 等离子 (表 2)。在第一成矿阶段的样品中 $Na^+ > K^+$, 这可能由于围岩蚀变特别强烈, 消耗了较多的 K^+ 的缘故; 而在成矿主期 (第二成矿阶段) 的样品中 $K^+ > Na^+$ 。因此, 围岩蚀变程度对成矿流体的组分有一定的影响。两阶段样品中 Ca^{2+} 含量变化不大, 只是成矿第 II 阶段的 Ca^{2+} 比第 I 阶段有所降低, 这可能是流体向晚期演化, 碳酸盐化作用增强, 造成 Ca^{2+} 含量减少的缘故。成矿第 I 阶段的流体中 $Cl^- > SO_4^{2-}$, 而成矿主期 (第二成矿阶段) 的流体 $SO_4^{2-} > Cl^-$ 。由于 SO_4^{2-} 含量反映的是介质中与金迁移有密切联系的 HS^- 的数量, 因此可以推测, 本矿床中的运移 (成矿主期) 主要是以金硫络合物的形式迁移。

表 2 蓬家乔金矿石英包裹体液相成分表 (10^{-6})

Table 2. Liquid composition of fluid inclusions from the Pengjiakuang gold deposit

样号	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Sun-1	1.65	16.69	3.63	0	0	12.62	4.25
Sun-2	13.59	3.37	2.43	0	0	2.53	2.835

注: 据孙丰月等, 1995

成矿流体的 Na^+/K^+ 和 F^-/Cl^- 比值是判别成矿流体来源的重要指标之一^[7]。本区成矿流体以 Na^+/K^+ 比值变化大 (分别为 10.11 和 0.25)、不含 F^- 为特征, 表明其既不是典型的岩浆水 (或变质水), 也不是典型的大气降水来源。

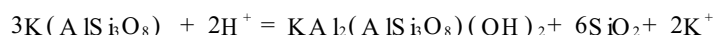
4 成矿的物理化学条件

4.1 流体捕获的温度、压力条件

前已述及, 根据流体包裹体测温结果, 蓬家乔金矿床第一成矿期的包裹体均一温度为 $340^\circ C$, 第二期为 $310 \sim 320^\circ C$, 第三期为 $280^\circ C$ 。上述温度可大致代表成矿最低温度, 即流体捕获温度的下限。爆裂温度是用 10 mg、大小在 0.4~0.2 mm 之间的纯度在 99% 左右的石英样品, 在中国科学院地质研究所高性能爆裂仪上获得的。结果表明, 蓬家乔金矿床第一成矿阶段的包裹体爆裂温度为 $282 \sim 338^\circ C$, 第二阶段为 $343 \sim 376^\circ C$, 第三阶段为 $380^\circ C$ 。成矿压力在 $50 MPa$ ^[5]。

4.2 成矿流体的 pH 条件

成矿热液的 pH 值对热液体系中的各种化学反映及矿质沉淀影响极大, 合理估算溶液 pH 值就显得非常重要。蓬家乔金矿蚀变岩型矿体内有较强的黄铁绢英岩化, 它是含矿流体对围岩交代作用的结果, 利用交代反应式:



可以估算流体的 pH 值。

根据热力学关系从上述反映式可以得出

$$pH \text{ 值} = 1/2 \lg k - \lg a_{K^+} = 1/2 \lg k - \lg m_{K^+} - \lg \gamma_{K^+}$$

这里 k 是反应式的平衡常数, mK^+ 和 γK^+ 是 K^+ 的摩尔浓度和活度系数。 mK^+ 可由包裹体气液相成分分析得到, k 和 γK^+ 可从 Helgesm (1967) 文献中查出^[4]。根据计算结果, 成矿第一阶段溶液的 pH 值为 5.67, 第二阶段为 6.30。而 250℃、300℃ 时纯水的中性点为 5.57 和 5.39, 因此, 成矿第一阶段为弱碱-中性环境; 成矿第二阶段 (金沉淀阶段) 为弱碱-中性环境。根据成矿第Ⅲ阶段有大量碳酸盐矿物形成的现象, 该阶段溶液应为较强的碱性。所以从成矿早阶段至末期, 流体可能由弱碱-中性→弱碱-中性→较强的碱性。

4.3 成矿流体的 pH、 f_{O_2} 和 Eh 条件

根据包裹体气相成分, 结合成矿温度和成矿压力, 利用李秉伦等 (1986) 的“矿物中包裹体气相和成分的物理化学参数图解”可以求得本矿床的氧逸度和氧化还原电位^[8]。本矿床第一成矿阶段的氧逸度 f_{O_2} 为 8.9×10^{-40} Pa; 第二阶段为 5.9×10^{-40} Pa; 氧化还原电位分别为 0.46 eV、0.52 eV。这说明本区成矿环境具弱还原环境, 成矿流体从早期至晚期氧逸度降低, 这可能是由于拆离断层进一步伸展、大气氧的混入减少造成的。

5 成矿流体来源及矿质迁移沉淀机制

5.1 成矿流体的来源

为了研究成矿热液的来源, 笔者分析了蓬家乔金矿不同中段代表性石英包裹体水的氧同位素组成。石英的氧同位素组成是用 BrF_5 法制备样品分析 (国家地震局地质研究所上官志冠测试), 石英中包裹体水的氢同位素组成则用加热法将包裹体爆裂 (取样温度 120~500℃), 用 Zn 法制备 H_2 后测定 (分析值相对于 SMOW, 中国科学院地质与地球物理所谢汉汉测试), 分析结果见表 3。表中 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值是根据贝克尔^[11]矿物-水平衡温度公式: $1000 \times \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.26 \times 10^6 \times T^{-2} - 2.98$, 将矿石中石英的 $\delta^{18}O_{\text{石英}}$ 换算成与之平衡的流体包裹体水的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值; δD_{H_2O} 则是直接测定石英流体包裹体水而得到的。表中的成矿温度为石英包裹体均一温度的平均值。

表 3 蓬家乔金矿区及部分岩体氢、氧同位素组成

Table 3. Oxygen and Hydrogen isotope composition of quartz and water in fluid inclusions of the Pengjiakuang fold ore district

矿区或岩体名称	成矿阶段	成矿温度	$\delta D_{H_2O}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{\text{石英}}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$
鹊山 ^[9]			- 82		+ 7.4~ + 8.0
昆崙山 ^[10]			- 73		+ 7.6~ + 8.0
院格庄 ^[10]			- 73		+ 9.1
蓬家乔 ^[5]	I	320	- 90		+ 4.0
	II	280			+ 0.7
蓬家乔	II	320	- 90	+ 6.9	0.6
	III	280	- 92	+ 7.8	1.0
	I	343	- 98	+ 6.2	0.6
	II	300	- 97	+ 8.7	0.9

自矿体的深部至浅部, $\delta^{18}O_{\text{石英}}$ 值有规律的增大, 这可能是由于水-岩反应及大气水的混入, 产生氧同位素交换造成的。在 δD - $\delta^{18}O$ 关系图上 (图 2), 蓬家乔成矿热液的氢氧同位素投影

点都落在岩浆水和大气水之间的区域内, 与银坑山、辽西金矿床的情况相似, 其成矿流体具有多源混合的特点。因此, 蓬家乔金矿的成矿热液不同于典型的岩浆热液, 而是受古大气水混杂的热液。结合本矿床的成因机制, 初始成矿热液可能来自火山晚期热液, 成矿早阶段即受到古大气水的混合, 并随着热液演化, 在成矿第二阶段混合程度加大, 使热液的氢、氧同位素组成发生进一步漂移。这与蓬家乔金矿第一成矿阶段发生在中温、中深部位的脆韧性剪切转换带, 第二、第三成矿阶段形成在中低温、浅层脆性构造环境的结论^[1-3]是一致的。

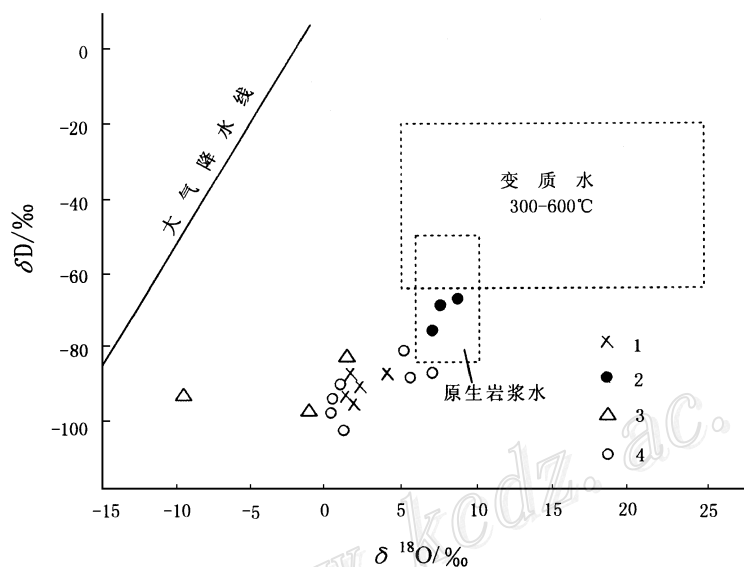


图2 蓬家乔金矿床 δD - $\delta^{18}O$ 关系图

1—蓬家乔金矿; 2—蓬家乔地区的花岗岩; 3—银坑山; 4—辽西金矿

Fig. 2. δD versus $\delta^{18}O$ diagram of the Pengjiakuang gold deposit.

1—Pengjiakuang gold deposit; 2—Granite in Pengjiakuang area; 3—Yinkengshan gold deposit;
4—Liaoxi gold deposit.

5.2 矿质迁移沉淀机制

金主要以两种价态(1价和3价)存在于自然界中。但在不同的氧逸度和 pH 条件下, Au^+ 的活度远大于 Au^{3+} 的活度。因此, 在天然热液中, 金主要以1价离子的各种络合物形式存在, 只有在极酸性 ($pH < 3$) 的强氧化条件下, 金可以呈3价 $AuCl_4^-$ 形式存在。根据本区热液流体的成分特点, 在成矿第一阶段的流体中 $Cl^- > SO_4^{2-}$, 且为弱碱-中性环境, 推测金主要呈 $Au(HS)_2^-$ 和 $AuCl_2^-$ 形式迁移; 而成矿主期(第二成矿阶段)的流体中 $SO_4^{2-} > Cl^-$, 且为弱碱-中性环境, 推测金主要呈 $Au(HS)_2^-$ 形式迁移。

研究资料^[15-16]表明, 在地热系统深部温度在 300℃ 左右的地带, 金主要呈 $AuCl_2^-$ 的形式出现, 低于 250℃ 则以 $Au(HS)_2^-$ 的形式出现。在本区金矿成矿的第一阶段(温度在 320℃, CO_2 含量较高, $\Sigma Cl^- > \Sigma H_2S$), 可能在较深部位沸腾, 热液中的 $AuCl_2^-$ 可能与岩石中的黄铁矿等发生反应, 即 $AuCl_2^-$ 被 Fe^{2+} 还原而使金发生沉淀, 所以金常与黄铁矿共生, 成矿以还原作用为主。当温度下降到 280℃ 左右时, CO_2 含量降低, 沸腾发生在较浅部, 一方面造成 CO_2

等气相大量逸出, 另一方面流体盐度又发生改变, 使得成矿介质条件有较大的变化, 加上大气水的混合, 大大提高了氧逸度, 导致 $\text{Au}(\text{HS})_2$ 的溶解度大幅度降低而分解沉淀, 金大量沉淀, 成矿主要以氧化作用为主。此时, 由于盐度增加, 贱金属的溶解能力增强, 形成了少量的多金属硫化物(成矿第二阶段)。

水-岩反应和古大气水的混入也是造成流体化学组成变化、金沉淀的重要因素^[17]。蓬家乔金矿的近矿围岩及蚀变岩型矿体中有较强的绢云母化、绿泥石化等蚀变, 水-岩反应一方面致使围岩中元素带入带出, 另一方面又使得流体的 pH 、 f_{O_2} 等物理化学条件改变。而这些因素都是金-硫络合物能否稳定存在的基础。条件改变, 络合物当然会分解, 金发生沉淀。而根据前面的包裹体水氢氧同位素分析, 无论是第一成矿期还是第二成矿期的样品, 都有古大气水混染的发生, 差别只在混合程度不同。古大气水的混入可导致热液成分的变化, 热液温度的降低, 这不可避免地使得金络合物分解, 金沉淀成矿。

6 结 论

(1) 蓬家乔金矿床为中、低温热液蚀变构造角砾岩型金矿, 成矿热液气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主; 液相成分中富 Na^+ 、 Cl^- , 贫 K^+ 、 F^- 。矿床第一成矿期的 f_{O_2} 为 $8.9 \times 10^{-40} \text{Pa}$; 第二期为 $5.9 \times 10^{-40} \text{Pa}$; 氧化还原位分别为 0.46eV 、 0.52eV , 具弱还原环境。从早期到晚期, pH 值的变化为弱碱-中性→弱碱-中性→较强的碱性。

(2) 蓬家乔金矿的成矿热液不同于典型的岩浆热液, 而是受古大气水混杂的热液。成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $0.6\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-90\text{‰} \sim -98\text{‰}$, 反映了成矿流体由大气水和岩浆水混合组成的特点。

(3) 流体混溶、水-岩反应和古大气水的混入是造成蓬家乔金矿床流体化学组成变化、金沉淀成矿的主要因素。

叶连俊、涂光炽、刘光鼎、蔡新平、张启锐、李慎之、蔺启忠、张宝林、王元龙等教授和专家给予了热情指导和帮助, 野外工作得到乳山市黄金公司、乳山大业金矿的支持, 谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 沈远超, 谢宏远, 李光明等. 山东蓬家乔金矿的基本地质特征及其找矿方向 [J]. 地质与勘探, 1998, 34 (5): 3~7.
- 2 杨金中, 沈远超, 李光明等. 山东乳山蓬家乔金矿矿体变化特征及深部成矿预测 [J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23 (2): 160~166.
- 3 杨金中, 沈远超, 刘铁兵等. 胶东东部蓬家乔金矿成矿规律及两翼找矿方向研究 [J]. 黄金科学技术, 1998, 6 (5~6): 29~33.
- 4 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- 5 孙丰月, 石淮立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 1995, 18~31.
- 6 张文淮, 张志坚, 伍刚. 成矿流体与成矿机制 [J]. 地学前缘, 1996, 3 (3~4): 245~252.
- 7 卢焕章, 李秉伦, 沈昆等. 包裹体地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1985, 153~155.
- 8 李秉伦, 石岗. 矿物中包裹体气相成分的物理化学参数图解 [J]. 地球化学, 1986, (2): 126~137.
- 9 徐金芳. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类的研究 [J]. 山东地质, 1989, (2): 1~122.
- 10 安家桐, 于东斌, 沈昆等. 山东牟平-乳山地区金矿控矿条件的研究 [C]. 见: 沈阳地质矿产研究所编. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 (胶东地区). 北京: 地质出版社, 1988, 1~45.
- 11 沈渭洲. 稳定同位素地质 [M]. 北京: 原子能出版社, 1987, 122~126.
- 12 Dee S J, Roberts R. Late-kinematic gold mineralization during regional uplift and the role of nitrogen: an example from the La Codosera area, W. Spain [J]. Mineralogical Magazine, 1993, 57: 437~450.
- 13 Duit W. Ammonium micas in metamorphic rocks as exemplified by Dome de L'Agout (France) [J]. Am. J. Sci. 1986, 286: 702~732.
- 14 Helgeson H C. Thermodynamic of hydrothermal system at elevated temperatures and pressures [J]. Amer. J. Sci., 1969, 267: 729~804.
- 15 Yardley B W D. Post-metamorphic gold-quartz veins from N. W. Italy: the composition and origin of the ore fluid [J]. Mineralogical Magazine, 1993, 57: 407~422.
- 16 Drumm S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal system [J]. Econ. Geol., 1985, 80: 126~147.
- 17 Diamond L W. Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val d'Ayas, Northwest Italian Alps [J]. Am. J. Sci., 1990, 290: 912~958.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF ORE-FORMING FLUIDS IN THE PENGJIAKUANG GOLD DEPOSIT, SHANDONG PROVINCE

Yang Jinzhong, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, Zeng Qingdong and Zou Weilei

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Key words: fluid inclusion, ore-forming fluid, geochemical characteristics, Pengjiakuang gold deposit, Shandong Province

Abstract

There are three types of gold deposits in Jiaodong gold metallogenic area. The altered rock type (Jiaojia type) and quartz vein type (Linglong type) were discovered several years ago. In recent years, a new type of gold deposits, viz., stratabound gold deposits, such as the Pengjiakuang gold deposit and the Songjiagou gold deposit, were discovered on the northeastern margin of Jialai basin.

The Pengjiakuang gold deposit occurs in a detached fault between conglomerate of Early Cretaceous Laiyang Formation and metamorphic complex of Lower Proterozoic Jingshan Group on the margin of Jialai basin. Formed before Yanshanian volcanic period, it was related to meteoric water and magmatic water. The host rocks have been extensively subjected to pyritization, silicification, sericitization and carbonatization. Individual orebodies have maximum length of 800 m, oblique extension of 500~700 m and gold grade of $1 \times 10^{-6} \sim 43 \times 10^{-6}$. The ore-forming fluids are rich in Na^+ and Cl^- but relatively impoverished in K^+ and F^- . In the main ore-forming stage, f_{O_2} and Eh values are $8.9 \times 10^{-40} \sim 5.9 \times 10^{-40}$ Pa and 0.46~0.52 eV respectively. The fluids in the inclusions have a wide range of homogenization temperatures from 200 °C to 340 °C; nevertheless, the best temperature range for gold deposition is from 280 °C to 320 °C. According to the data of hydrogen, oxygen isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.6\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -90\text{‰} \sim -98\text{‰}$), the conclusion can be reached that ore-forming fluids of the Pengjiakuang gold deposit seemed to be a kind of mixed hydrothermal-dissolution which was mainly composed of meteoric water and magmatic water. Fluid immiscibility and fluid-rock interaction might have been the main factors for gold deposition in the mine.