陕西省双王金矿床成矿流体特征及其地质意义

刘必政[1]，王建平[1]，王可新[1]，刘家军[1]，谢海鹰[1]，
曹瑞荣[2]，惠德峰[2]，程建军[2]

(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. 陕西太白黄金矿业有限责任公司，陕西 太白 716000)

摘要：双王金矿位于陕西省太白县西南部，矿床赋存于秦岭泥盆系地层中。双王金矿床8号、9号、7号、5号、6号、2号矿体内热液矿物流体包裹体系统研究表明：成矿早期、主成矿期和成矿后期包裹体均一温度主要范围分别为300～463 ℃、220～340 ℃和100～279 ℃。主成矿期成矿流体具有低盐度（2.1%～22.7% NaCleqv）、富CO_2和含有N_2、CH_4等气体的特征。从矿区东部向西部成矿压力有逐渐降低的趋势，流体体系趋于开放。成矿流体来源较为复杂，以岩浆水和变质水为主，后期有大气降水的混入。包裹体的多样性及演化特征和角砾岩型矿化特征显示双王金矿床成矿流体具有不混溶性特征，成矿压力约为100～170 MPa。流体的减压沸腾是导致金沉淀成矿的重要原因。

关键词：双王金矿床；成矿流体；流体包裹体；流体不混溶性

中图分类号：P618.51 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8527(2001)06－1088－11

Characteristics and Geological Significance of Fluid Inclusions in the Shuangwang Gold Deposit, Shaanxi Province

LIU Bi-zheng[1], WANG Jian-ping[1], WANG Ke-xin[1], LIU Jia-jun[1], XIE Hai-ying[1],
CAO Rui-rong[2], HUI De-feng[2], CHENG Jian-jun[2]

(1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *Shaanxi Taibai Gold Mining Co. Ltd, Taibai, Shaanxi* 716000, *China*)

Abstract: The Shuangwang gold deposit is located in the southwest of Taibai County, Shaanxi Province. It occurred in the Devonian strata of the Qinling orogenic belt. Systematic fluid inclusion study of hydrothermal minerals from No. 8, 7, 9, 5, 6 and 2 ore bodies shows that the inclusions of the Shangwang gold deposit had diversity of characteristics. The range of homogenization temperature of inclusions in early ore-forming stage, main ore-forming stage and late ore-forming stage are from 300 to 463 ℃, 220 to 340 ℃, and 100 to 279 ℃ respectively. The characteristics of main ore-forming stage fluid are low salinity content (2.1%－22.7% NaCl eqv), rich in CO_2 and containing N_2, CH_4 and other gases. From east to west, the trapping pressure is gradually decreasing, and the open fluid system tends to be dominant. Mineralizing fluids were mixed fluids which mainly originated from magmatic and metamorphic water. At the later stage, some meteoric water joined into the fluid system. The diversity and evolution of fluid inclusions and a large number of breccia ores indicate that ore-forming fluids of the Shuangwang gold deposit have the characteristics of fluid unmixing, the metallogenic pressure is from 100 to 170 MPa. Boiling caused by decreasing of fluid pressure is the most important reason of gold deposition.

Key words: Shuangwang gold deposit; ore-forming fluid; fluid inclusion; fluid immiscibility

收稿日期：2011-07-18；**改回日期**：2011-11-08；**责任编辑**：楼亚儿。

基金项目：国家自然科学基金项目(41030423)；中国黄金集团公司科技项目“陕西省太白县双王金矿床地质特征、成矿规律及找矿靶区再研究”。

作者简介：刘必政，男，硕士研究生，1985年出生，矿物学、岩石学、矿床学专业，主要从事矿床地球化学研究。Email: bizheng1985@sina.com。

通信作者：王建平，男，副教授，1972年出生，矿物学、岩石学、矿床学专业，主要从事金属矿产资源的研究与教学工作。Email: jpwang@cugb.edu.cn。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0　引　言

双王金矿床位于陕西省太白县西南部，为一个大型低品位易采易选的金矿床。其角砾岩型矿化与同区其他金矿床有较大的差别，因此自其被发现以来，备受地质工作者瞩目。近年来对双王金矿床的研究主要集中在矿床的成因、原生叠加晕、角砾岩成因、地球化学和包裹体等方面[1-6]。前人在流体包裹体方面的研究主要集中在开采程度较高的 8 号矿体，对矿区西部矿体中流体包裹体的研究工作很少，从而制约了对双王金矿床成矿规律的深入认识。本文通过不同矿体、不同标高、不同穿脉中样品的流体包裹体显微测温和组分分析，对双王金矿床成矿流体进行了详细研究，旨在了解双王金矿床的流体性质、来源和演化规律，从而探讨金的沉淀富集机制。

1　区域地质背景

双王金矿床位于东—西秦岭衔接部位靠近西秦岭的一侧，大致为 NW—SE 向呈带状分布于王家楞至王家庄一带。矿床的大地构造位置处于秦岭造山带中秦岭海西—印支褶皱带凤县—镇安褶皱束的西段北缘，区域性的深大断裂商丹断裂和礼县—山阳断裂分别从矿区的北侧和南侧通过(图 1)，双王金矿床所处的大地构造单元为中秦岭弧前盆地系[7]。

区域范围内出露的地层主要为泥盆系的海相粘土岩、碎屑岩夹碳酸盐岩，地层总厚度大于 5 km，经过区域变质作用后，形成了粉砂质绢云板岩、变质粉砂岩以及厚度不等的结晶灰岩。矿区范围内出露地层为泥盆系中统地层，主要为一套浅海相的粉砂质泥岩及碳酸盐岩沉积。矿区内地层上、中、下泥盆统均可见，由老到新依次为下泥盆统王家楞组(D_1w)、中泥盆统古道岭组(D_2g)、上泥盆统星红铺组(D_3x)和九里坪组(D_3j)。其中位于矿区中部的星红铺组(D_3x)是含金角砾岩的主要赋矿层位，岩性主要为中—薄层变质粉砂岩、粉砂质绢云板岩、薄—微薄层状粉砂岩和夹层状钠质岩系(图 2)。

区域范围内的岩浆活动以印支期的酸性岩浆侵入为主，在双王含金角砾岩带的西南部(1 ~ 3 km)形成了西坝复式岩体，为多期岩浆活动的产物，由早期中性的石英二长闪长岩和晚期酸性的二长花岗岩组成[9]。此外，区域内还发育一些燕山期的小规模花岗斑岩脉和煌斑岩脉。

矿区内构造线大体呈 NW310°—SE130°方向，由一系列的线状褶皱和断裂组成。矿区内的主要褶皱构造为西坝复式背斜，复式背斜北翼发育的次级褶皱为银硐沟背斜、元坝子向斜和古迹背斜。矿区的断裂构造走向以 NW 向为主，主要断层有两条，分别为南部的王家楞断层和北部的修石崖断层，其次为成矿后形成的近 SN 向的小规模

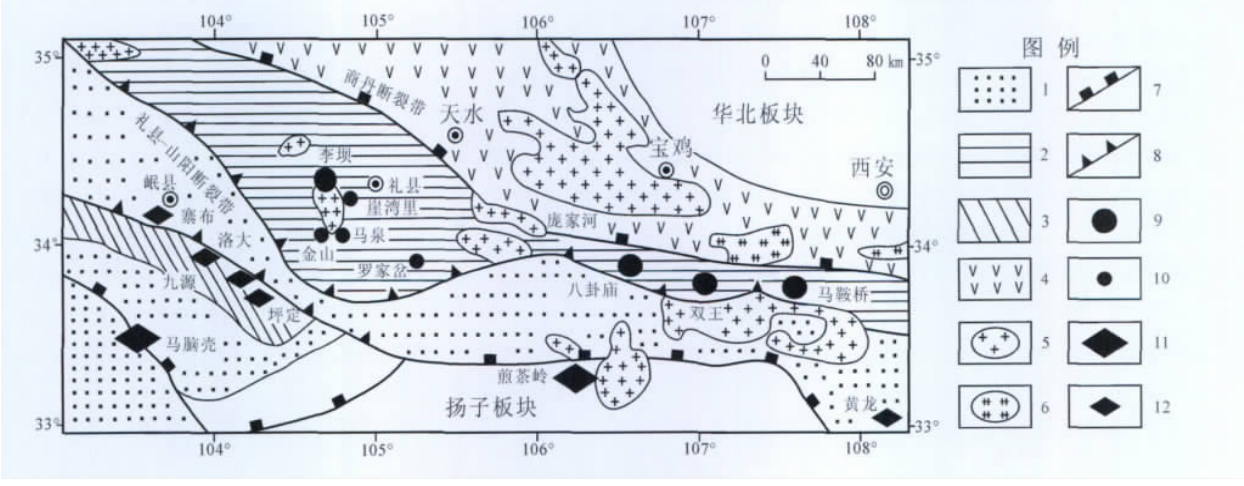


图 1　双王金矿床及其邻区地质简图(据 Mao et al[8]，2002，略有修改)

Fig. 1　Simplified geological map of the Shuangwang gold deposit and its near area (after Mao et al[8], 2002)

1. 三叠系硬砂岩、板岩；2. 晚古生代复理石；3. 寒武系—奥陶系板岩、含碳质沉积岩；4. 早古生代岛弧杂岩；5. 三叠纪—侏罗纪花岗质岩体；6. 寒武纪—奥陶纪花岗质岩体；7. 区域断裂带；8. 区域逆冲断裂带；9. 储量大于 50 t 的造山型金矿；10. 储量小于 50 t 的造山型金矿床；11. 储量大于 50 t 的卡林型金矿床；12. 储量小于 50 t 的卡林型金矿床

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

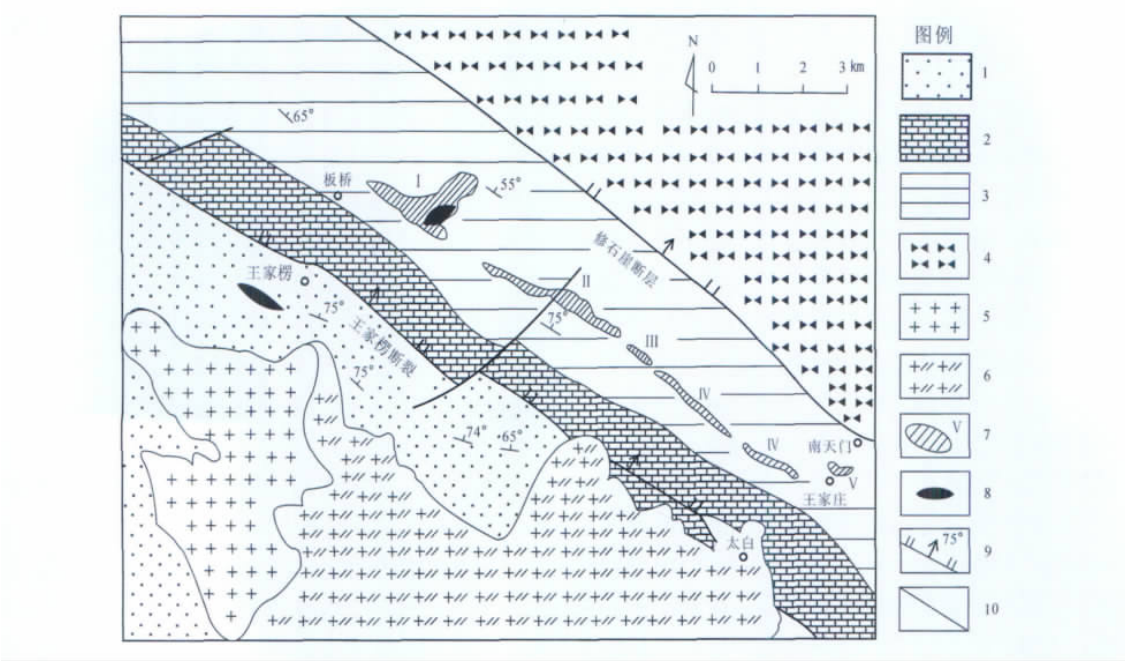


图 2 双王金矿床矿区地质略图(据石准立等[10],1993,略有修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Shuangwang gold deposit (after Shi et al[10], 1993)

1. 下泥盆统王家楞组砂岩和灰岩; 2. 中泥盆统古道岭组砂岩和灰岩; 3. 上泥盆统星红铺组变质粉砂岩和板岩; 4. 上泥盆统九里坪组粉砂岩和板岩; 5. 晚三叠世—早侏罗世二长花岗岩; 6. 晚三叠世—早侏罗世石英二长闪长岩; 7. 含金角砾岩体及其编号; 8. 花岗斑岩脉; 9. 正断层及其产状; 10. 性质不明断层

断层。

2 含金角砾岩带特征

双王金矿床赋存于钠长角砾岩带中,矿床的分布与产状都受到角砾岩体的控制。角砾岩带总体走向为290°~310°,断续长度约11.5 km。地表出露有大小不一的5个角砾岩体(自西向东依次编号为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ号角砾岩体),长550~3 600 m,宽4~500 m,延伸超过700 m(图2)。以太白河和红崖河之间的分水岭为界,将该区矿带分为东、西两段,东段长约5 km,西段长约6.5 km[1]。Ⅰ号角砾岩体平面形态呈不规则状,其余角砾岩体呈带状或扁透镜状,其中Ⅳ号角砾岩体由两部分组成。8、9、7号矿体,以及5号矿体大部分自东向西依次位于Ⅳ号角砾岩体中,5号矿体少部分位于Ⅲ号角砾岩体内,6号矿体位于Ⅱ号角砾岩体东部,2号矿体位于Ⅱ号角砾岩体西部。即从东到西依次为8号、9号、7号、5号、6号、2号矿体。总体上,位于矿区东部规模最大的8号矿体矿化程度较高,位于矿区西部的2号矿体矿化程度较低。

双王金矿床含金角砾岩的角砾与胶结物界限清晰。角砾主要为浅灰色—浅棕黄色钠长石化板岩或粉砂岩,形态多为不规则棱角状、三角状、板条状,粒径大小不一,具有一定的可拼性;胶结物主要为多阶段热液活动所形成的含铁白云石、黄铁矿、方解石、石英;金主要赋存于胶结物中。

3 流体包裹体研究

根据前人的研究结果[1,4-5],结合在野外对不同类型矿化角砾岩的详细观察,本文对双王金矿床的成矿阶段进行了划分,将矿床成矿过程从早到晚依次分为4个阶段:①钠长石-石英阶段;②含铁白云石-黄铁矿阶段;③黄铁矿-方解石-石英阶段;④萤石-迪开石-石膏阶段。其中,含铁白云石-黄铁矿阶段为主要成矿阶段。通过对不同成矿阶段热液矿物中流体包裹体的研究,从而更加全面地了解双王金矿床成矿流体的特征。

3.1 样品的采集与测试

本文用于流体包裹体研究的样品采自双王金矿床8号、9号、7号、5号、6号、2号矿体的不同中段、不同穿脉中,主要为含矿角砾岩。8号矿体中所采样品标高分别为1 100 m、1 150 m、1 200 m和1 250 m;9号矿体中所采样品标高分别为1 100 m、1 150 m、1 200 m和1 250 m;7号矿体中所采样品的标高为1 330 m;5号矿体中所采

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

样品标高分别为 1 420 m、1 670 m、1 690 m；6 号矿体中所采样品标高为 1 600 m；2 号矿体中所采样品标高为 1 600 m。即从东向西标高逐渐升高。本文测试的流体包裹体寄主矿物主要为含铁白云石及少量石英和方解石。

流体包裹体显微测温在中国地质大学(北京)流体包裹体实验室进行，采用 LinkamMDSG 600 冷热台进行测试(测温范围 -196 ~ 600 ℃)。均一温度测定误差为 ±2 ℃，冰点测定误差为 ±0.2 ℃，升温、降温速率开始时为 10 ℃/min，在相变点温度附近速率降为 0.5 ℃/min。对同一包裹体进行加热和冷冻双重测定时，进行两次及两次以上测定，以核查温度的准确性和包裹体是否泄漏。

激光拉曼光谱分析在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院资源勘查实验室进行，采用英国 Renishaw 公司的 System - 1000 型激光拉曼光谱仪(选用 Ar^+ 激光器，波长为 514 nm，激光束斑大小约为 1 μm，所测光谱的计算时间为 10 s，每 1 cm^{-1}(波数)计数一次，100 ~ 4 000 cm^{-1} 全波段一次取峰，光谱分辨率 2 cm^{-1}。

包裹体成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成，采用日本岛津公司 GC - 2010 型气相色谱仪，和日本岛津公司 HIC - SP Super 型离子色谱仪。GC - 2010 型气相色谱仪最低检出限为 1×10^{-6}；HIC - SP Super 型离子色谱仪最低检出限阴离子为 1×10^{-9}，阳离子为 1×10^{-6}。

3.2　流体包裹体岩相学特征和类型

通过包裹体岩相学观察可见含铁白云石、石英等热液矿物中发育大量的原生包裹体，以含铁白云石中最多。双王金矿床主成矿期含铁白云石中每平方毫米中包裹体可达 500 ~ 2 500 个，反映了包裹体被捕获时处在比较动荡的环境中，是矿物快速结晶所形成的[1]。原生包裹体长轴从 2 ~ 20 μm 均有出现，但普遍偏小，主要集中在 3 ~ 7 μm 之间。各类型包裹体的充填度大小不一，充填度 10% ~ 90% 均有出现，一般多为 60% ~ 90%。包裹体的形态以椭圆状和不规则状居多，其次为负晶形、长条形和少量三角形。包裹体液相部分多为无色透明状，气相部分因成分不同而呈现不同的状态，如无色透明、黑色不透明。

根据流体包裹体岩相学观察和显微测温，本文将双王金矿床流体包裹体分为 4 个类型。

Ⅰ型：水溶液包裹体，以气液两相为主(图 3A)。根据包裹体充填度的不同，水溶液包裹体又可进一步细划分为两个亚类：Ⅰa 液体包裹体，大部分水溶液包裹体为此类型，一般均一到液相；Ⅰb 气体包裹体，有的气相充填度最高可达 90% 以上，均一温度略高于Ⅰa 型，均一到气相。不同充填度的包裹体位于同一视域中(图 3B)，这两种亚类包裹体有在相似的温度下异相均一的特征。

Ⅱ型：CO_2-H_2O-NaCl 包裹体，由水溶液、气相 CO_2、液相 CO_2 三相组成(图 3C)。室温较高时，气相 CO_2 和液相 CO_2 常常部分均一呈一相。

Ⅲ型：纯 CO_2 包裹体，室温较高时，常呈一相。其透明度较好，降温到 30 ℃以下时易出现剧烈跳动的气相呈气液两相(图 3D)，易与单相的水溶液包裹体混淆。

Ⅳ型：含子矿物的多相包裹体，这类包裹体只在极少数薄片中观察到，不仅数量很少，而且本身个体偏小，主矿物透明性较差，所以只在测试中观察了个别此类包裹体的现象，但并未做详细的测试研究，其中包含的子晶种类有石盐、含铁白云石、黄铁矿[2]。

由以上可以看出，在同一视域下(同一矿物晶体上)，不同充填度的水溶液包裹体共生，并且含有盐类子矿物；水溶液包裹体与 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体共生，说明双王金矿床成矿流体包裹体为不混溶包裹体群。

3.3　流体包裹体的物理化学参数

通过流体包裹体的显微测温，得到了包裹体的冰点、完全均一温度、部分均一温度、笼合物熔化温度等一系列的数据(表 1)。

从表中可以看出，主成矿期含铁白云石中Ⅰ型包裹体的均一温度为 178 ~ 449 ℃，范围比较大，主要范围为 220 ~ 340 ℃(图 4A)，均一至液相的较多，均一至气相的较少。Ⅱ型包裹体的均一温度为 219 ~ 412 ℃，主要范围为 260 ~ 340 ℃，峰值为 320 ℃(图 4B)。Ⅲ型包裹体的均一温度为 16 ~ 26 ℃，主要范围为 16 ~ 20 ℃(图 4C)。早期石英(为钠长石中的石英细脉)中Ⅰ型包裹体的均一温度为 300 ~ 463 ℃，晚期石英(为胶结物中与含铁白云石共生的团块状石英，以及粗粒石英脉)中Ⅰ型包裹体的均一温度为 101 ~ 279 ℃。可以看出从早期到晚期均一温度逐渐降低。

此外，在同一矿物晶体上许多不同盐度的水溶液包裹体具有大致相同的均一温度；在含铁白云石中同一视域范围内水溶液包裹体和 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体这两个端元紧密共生，均一温度也大

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

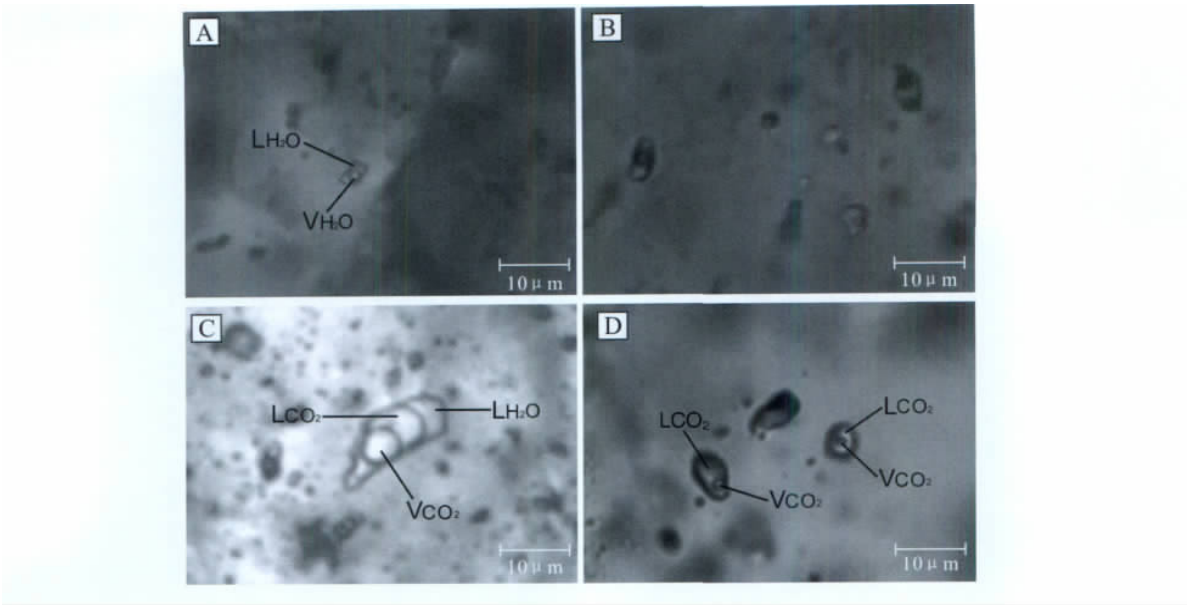


图 3 双王金矿床包裹体显微照片

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions of the Shuangwang gold deposit

A. 水溶液包裹体; B. 不同充填度的包裹体共生; C. $CO_2-H_2O-NaCl$ 包裹体; D. 纯 CO_2 包裹体

表 1 双王金矿床包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions from the Shuangwang gold deposit

矿体	主矿物	类型	t_{m,CO_2}/℃(个数)	$t_{m,ice}$/℃(个数)	$t_{h,cla}$/℃(个数)	t_{h,CO_2}/℃(个数)	t_h/℃(个数)
8 号	含铁白云石	Ⅰ		-19.8 ~ -1.3(58)			217.4 ~ 449.8(67)
		Ⅱ	-60.4 ~ -57.1(16)		2.3 ~ 6.5(7)	17.6 ~ 27.1(16)	219.8 ~ 412.2(16)
	石英(早期)	Ⅰ		-16.2 ~ -2.4(9)			300.7 ~ 463.2(13)
		Ⅱ	-59.8 ~ -59.4(3)			20.1 ~ 21.5(3)	429.8 ~ 449.8(4)
	石英(晚期)	Ⅰ		-18.6 ~ 0.3(11)			101.8 ~ 169.9(11)
9 号	含铁白云石	Ⅰ		-20.1 ~ -2.1(43)			190.5 ~ 383.8(48)
		Ⅱ	-59.1 ~ -58.8(4)		4.4 ~ 6.3(3)	23.3 ~ 26.6(4)	311.5 ~ 317.6(3)
		Ⅲ	-60.3 ~ 58.7(8)			18.2 ~ 24.3(11)	
	石英(晚期)	Ⅰ		-15.8 ~ -1.2(9)			106.9 ~ 246(17)
7 号	石英(晚期)	Ⅰ		-9.5 ~ -4.0(12)			121.3 ~ 276.4(12)
5 号	含铁白云石	Ⅰ		-16.8 ~ -1.4(66)			178.1 ~ 349.6(72)
		Ⅱ	-58.5 ~ -56.8(3)			20.6 ~ 24.3(2)	238.1 ~ 258.6(3)
		Ⅲ	-60.4 ~ -57.9(17)			16.6 ~ 31.6(20)	
	石英(晚期)	Ⅰ		-11.8 ~ -3.7(15)			150.1 ~ 279.2(14)
		Ⅱ	-58.7 ~ 58.4(5)		7.8 ~ 8.7(3)	29.4 ~ 31.4(5)	258.2 ~ 320.7(5)
6 号	含铁白云石	Ⅰ		-10.9 ~ -1.2(14)			191.5 ~ 431.4(18)
		Ⅱ	-59.8 ~ -57.6(3)		7.8 ~ 8.2(2)	23.8 ~ 26.4(3)	309.5 ~ 328.9(3)
		Ⅲ	-60.2 ~ -58.3(5)			17.1 ~ 23.9(4)	
2 号	含铁白云石	Ⅰ		-7.2 ~ -4.5(5)			237.7 ~ 368.7(8)
		Ⅱ	-59.4 ~ -57.3(3)		7.6(1)		301.0 ~ 320.4(3)

注: t_{m,CO_2}. 固体 CO_2 的最终熔化温度; $t_{m,ice}$. 冰熔化温度; $t_{h,cla}$. 笼合物熔化温度; t_{h,CO_2}. CO_2 部分均一温度; t_h. 完全均一温度。

致相似,并且富气相的端元均一到了气相,富液相的端元均一到了液相,说明流体包裹体为沸腾包裹体群。

含铁白云石中水溶液包裹体的 $t_{m,ice}$ 为 -20.1 ~ -1.2 ℃,根据 $NaCl-H_2O$ 体系盐度计算[11]得出相应的盐度为 2.1% ~ 22.7% NaCl eqv; 早期石英

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

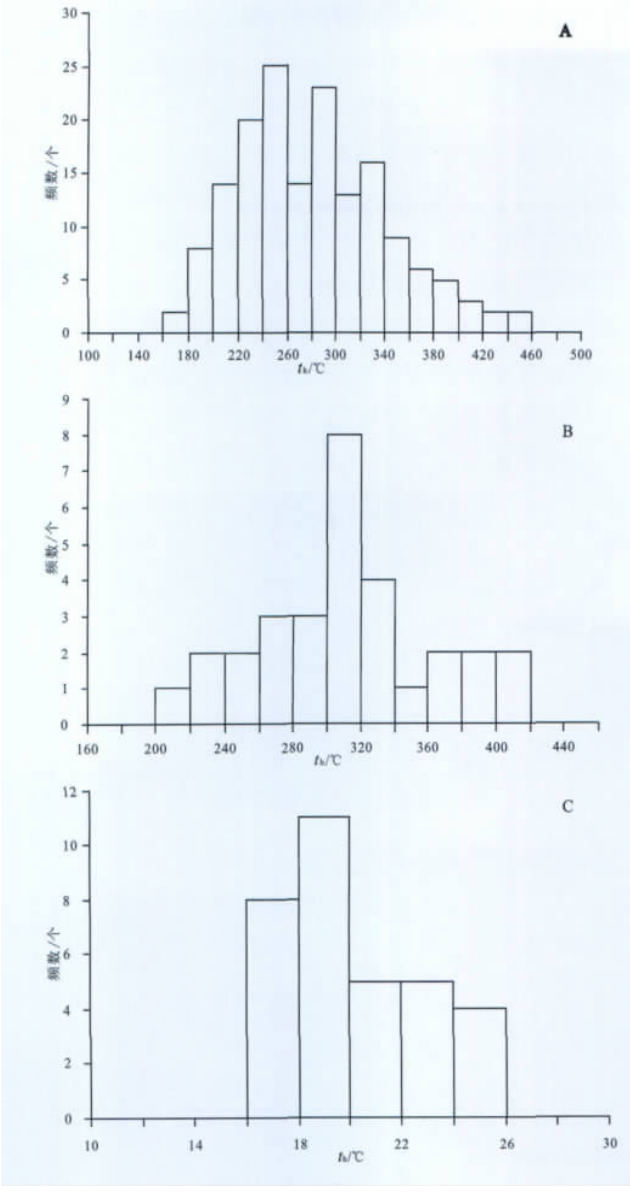


图 4　双王金矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4　Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions from the Shuangwang gold deposit

A. 水溶液包裹体均一温度；B. CO_2-H_2O-NaCl 包裹体均一温度；C. 纯 CO_2 包裹体部分均一温度

中水溶液包裹体的 $t_{m,ice}$ 为 -16.2 ~ -2.4 ℃，相应的盐度为 4.1% ~19.7% NaCl eqv；后期石英中水溶液包裹体的 $t_{m,ice}$ 为 -18.6 ~ -0.3 ℃，相应的盐度为 0.53% ~ 21.65% NaCl eqv；多种类型包裹体共存于同一主矿物中导致了获得的盐度范围比较大，而盐度从早期到晚期变化不大。

CO_2-H_2O-NaCl 包裹体缓慢升温过程中笼合物的熔化温度为 2.3 ~8.7 ℃，根据 CO_2 笼合物熔化温度和盐度关系表[12] 查出相应的盐度为 2.58% ~ 12.81% NaCl eqv。由于双王金矿床成矿流体具有不混溶性，而在沸腾状态下捕获的包裹体的均一温度和均一压力等于捕获温度和捕获压力，即成矿温度和成矿压力。根据含铁白云石中纯 CO_2 包裹体的均一温度为 16 ~ 26 ℃，平均值为 21 ℃，因此在含 CO_2 包裹体的均一温度和 CO_2 相密度关系图解[13] 中查得相应的包裹体 CO_2 相密度约为 0.70 ~0.82 g/cm^3，对于盐度在 6% NaCleqv 左右的包裹体，根据密度和完全均一温度，在 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体 x_{CO_2}、φ_{CO_2}、ρ_{CO_2} 与 t_h（x_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔分数，φ_{CO_2} 为 CO_2 的体积分数，ρ_{CO_2} 为 CO_2 的相密度，t_h 为均一温度，p 为压力）体系图中查得摩尔分数和体积分数，然后在 x_{CO_2}、φ_{CO_2} 与 p 体系图中[14] 查得压力。估算出的压力变化范围较大，并且存在异常高压，小于 40 MPa 和大于 200 MPa 的都有出现，但主要集中在 100 ~ 170 MPa，这与形成角砾构造的机制有关。假设成矿时系统处于封闭状态，由静岩压力 $p=\rho gh$（设岩石密度 ρ 为 2.7 g/cm^3）换算成矿深度 h；如果成矿时系统处于开放状态，则按流体静水压力（设流体密度为 1 g/cm^3）换算成矿深度，该值为最大成矿深度[15]。

根据主成矿期含铁白云石中包裹体的显微测温结果计算获得矿区流体参数（表 2），可以看出从东部向西部，密度基本不变，盐度略有降低，即从深部向浅部略有降低，但变化范围不大，可能与晚期大气降水的混入有关。由于从东向西包裹体均一温度逐渐降低，因此其成矿压力也相应降低，与在 2 号矿体内部发现大量成矿晚阶段的石膏和迪开石等相对应，说明晚期成矿深度变浅或者成矿体系逐渐转变为开放体系，可能有大气降水的混入，流体体系由静岩压力体系转变为静水压力体系。因此主成矿期应为静岩压力，后期逐渐转变为静水压力。根据主成矿期不混溶包裹体的压力计算得出双王金矿床的成矿深度大约在 3.8 ~6.4 km。

表 2　双王金矿床含铁白云石包裹体参数

Table 2　Physic-chemical parameters of fluid inclusions in ankerite from the Shuangwang gold deposit

矿体	盐度/% NaCleqv		密度/(g/cm^3)	
	范围	均值	范围	均值
8 号	2.23 ~22.52	9.7	0.65 ~1.10	0.98
9 号	2.60 ~22.73	9.3	0.79 ~1.02	0.98
5 号	2.41 ~20.07	9.1	0.43 ~1.03	0.95
6 号	2.57 ~14.87	8.5	0.75 ~1.02	0.97
2 号	8.41 ~10.73	8.4	0.73 ~0.95	0.95

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.4 流体包裹体的成分

在显微测温时发现，CO_2-H_2O-NaCl 包裹体中固相 CO_2 的最终熔化温度为 -60.4 ~ -56.6 ℃，低于纯 CO_2 的固相熔化温度 -56.6 ℃，表明除了 CO_2 外还含有其他成分。通过激光拉曼光谱测试发现主成矿期含铁白云石中包裹体的气相成分还含有 N_2 和 CH_4，液相成分主要为 H_2O 和 CO_2(图 5)。通过包裹体成分测试获得流体包裹体中气相成分和液相成分见表 3 和表 4。

气相组分主要为 CO_2、H_2O、N_2，其次为 O_2，并含有少量的 CH_4 和 CO 以及微量的 C_2H_2、C_2H_4 和 C_2H_6 等，且普遍存在于富气相的包裹体中。主成矿期含铁白云石中 CO_2 和 H_2O 的含量较高，明显高于晚期石英和方解石中的含量，尤其以 CO_2 最为明显；CH_4 等还原性有机气体在主成矿期含铁白云石中较多，暗示成矿流体为还原性质的热液体系，而还原环境也有利于黄铁矿的沉淀和金的富集。此外，在 CO_2-H_2O-NaCl 体系中加入少量 CH_4，将扩大不混溶的区域，有利于成矿[16]。样品中含有微量的碳氢化合物，与含矿围岩为富含碳质板岩的地质事实相吻合[17]。

液相组分主要为 H_2O，主成矿期含铁白云石

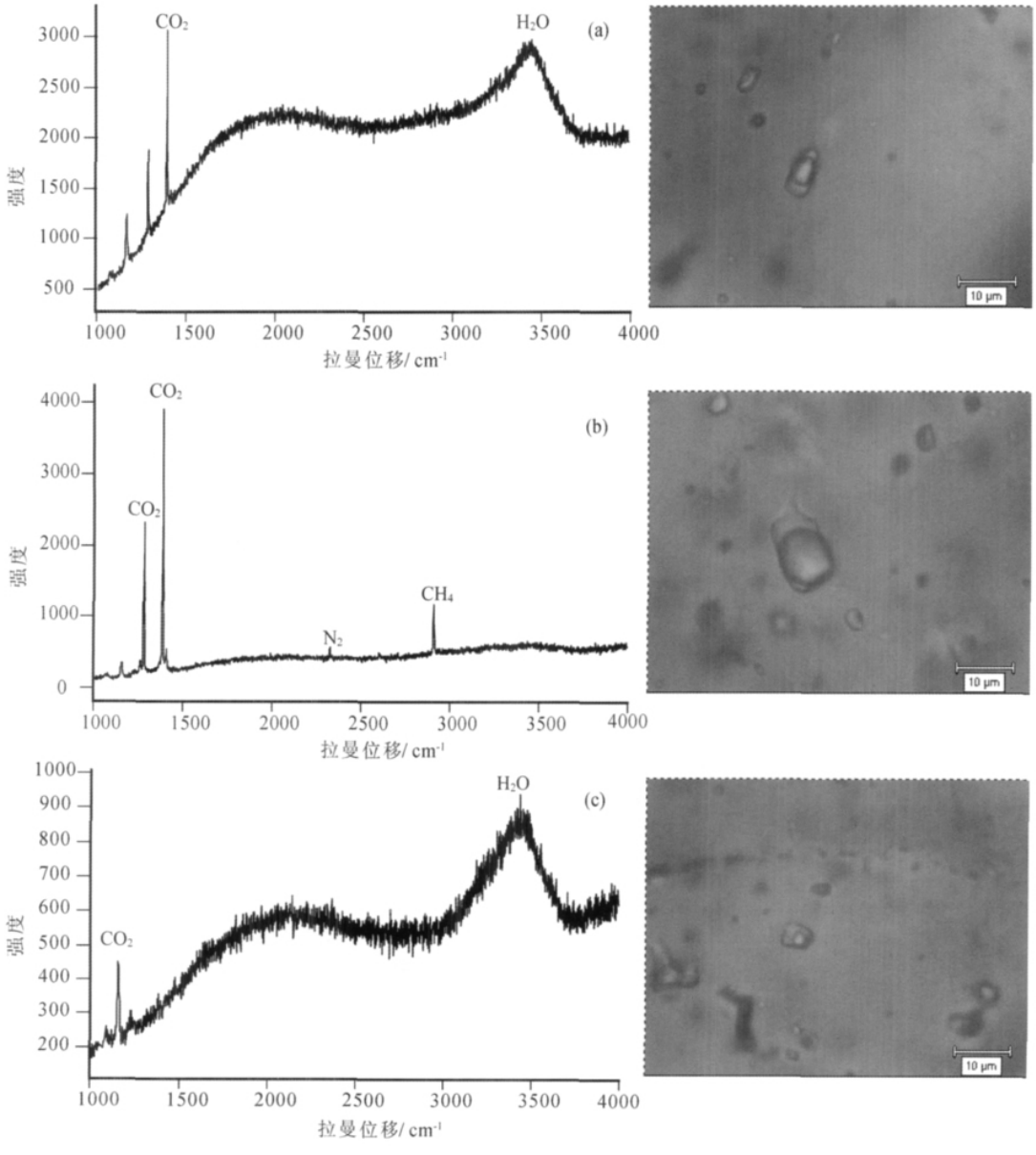


图 5 双王金矿床流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 5 Laser Raman spectra of fluid inclusions of the Shuangwang gold deposit

(a) 包裹体液相成分激光拉曼图谱；(b) 包裹体气相成分激光拉曼图谱；(c) 包裹体液相成分激光拉曼图谱

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　双王金矿包裹体气相成分(w_B/(μg/g))

Table 3　Gas phase composition of fluid inclusions from the Shuangwang gold deposit

样品编号	矿物	CH_4	$C_2H_2+C_2H_4$	C_2H_6	CO_2	H_2O	O_2	N_2	CO
3CM28－1	石英(晚期)	0.390	0.038	微量	122.807	86.993	7.317	34.862	0
3CM28－1	含铁白云石	0.488	0.083	微量	448.556	169.954	34.416	161.095	17.102
3CM44－6	含铁白云石	0.939	0.046	微量	291.887	156.115	14.610	65.790	0
4CM36－4	含铁白云石	1.315	0.068	微量	262.485	204.362	10.551	50.783	0
4CM36－8	含铁白云石	3.247	0.077	0.029	315.268	242.261	11.370	52.711	0
4CM38－5	含铁白云石	2.774	0.139	0.028	509.314	344.629	12.551	64.750	21.419
1520CM75－1	方解石	0.366	0.094	微量	125.437	58.704	10.930	51.793	0
1600CM75－1	方解石	0.510	0.111	微量	258.378	395.301	19.435	91.844	19.175

注：测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所。

表 4　双王金矿包裹体液相成分(w_B/(μg/g))

Table 4　Liquid components of fluid inclusions from the Shuangwang gold deposit

样品编号	矿物	Li^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
3CM28－1	石英(晚期)	0	11.118	1.991	1.233	49.721	0.158	25.840	0	0	0.055	7.231
3CM28－1	含铁白云石	0	26.497	4.337	67.223	－	0.398	64.368	0	0.133	0.199	－
3CM44－6	含铁白云石	0	36.259	5.611	58.701	－	0.294	73.678	0	0.136	0.143	－
4CM36－4	含铁白云石	2.115	62.517	8.397	110.820	－	0.561	80.602	0	0.176	0.453	－
4CM36－8	含铁白云石	0.748	24.519	5.179	37.365	－	1.025	60.530	0	0.077	0.439	－
4CM38－5	含铁白云石	0	45.676	6.658	73.803	－	0.367	75.958	0	0.132	0.125	－
1520CM75－1	方解石	0.154	8.391	0	6.574	－	1.169	3.473	0	0	0.148	－
1600CM75－1	方解石	0	9.695	0.813	3.954	－	1.528	4.592	0	0.154	0.266	－

注　“－”表示低于检测限；测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所。

中阳离子含量从大到小依次为 $Mg^{2+}>Na^+>K^+$，Ca^{2+}的含量低于检测限，阴离子以 Cl^-为主，其次为 F^-，还有少量的 NO_3^-；晚期石英中阳离子含量从大到小依次为 $Na^+>K^+>Mg^{2+}$，并含有 Ca^{2+}，阴离子以 Cl^-为主，并含有 SO_4^{2-}；晚期方解石中阳离子含量从大到小依次为 $Na^+>Mg^{2+}>K^+$，阴离子主要为 Cl^-。总之，阴离子主要为 Cl^-，其次为 F^-，从主成矿期到晚期 Cl^-含量逐渐减少；主成矿期含铁白云石中 K^+和 Mg^{2+}含量要高于方解石和石英中的 K^+和 Mg^{2+}含量，因此推断 K^+和 Mg^{2+}对成矿有控制作用。

双王金矿床流体包裹体成分特征见表 5。组分比值(摩尔分数比值)为：CO_2/H_2O 在不同矿物中变化不大；CH_4/CO_2 在含铁白云石中较高，在方解石中较低；K^+/Na^+很小，推测是双王金矿床的容矿围岩为钠长石所致，K^+/Na^+从主成矿期到晚期有降低的趋势；F^-/Cl^-在含铁白云石中较低，在后期石英中略有升高，在方解石中升高明显，总体上从主成矿期到晚期 F^-/Cl^-呈逐渐升高的趋势，表明热液来源从以壳源为主向以幔源为主演化。主成矿期阴离子以 Cl^-为主，金主要以氯基络合物的形式发生迁移搬运，在物理化学等条件发生改变的情况下，氯基络合物中的金离子分解出来，并沉淀成矿，这一过程消耗了大量的 Cl^-，也导致了后期 F^-/Cl^-比值升高。F^-/Cl^-比值很小时，即成矿热液中以 Cl^-为主要阴离子，F^-及其他阴离子的作用可以忽略时，反映原生沉积或地下热卤水成因[18]。双王金矿床主成矿期含铁白云石中阴离子主要为 Cl^-，而且 F^-/Cl^-比值很小，所以推测为热卤水成因。

3.5　流体的氧逸度和 pH 值

不同成矿阶段的氧逸度可以反映成矿过程中的氧化还原环境的变化情况。本文利用所得包裹体成分分析结果，根据 CH_4-CO_2-H_2O 体系的参数[19]计算得出主成矿阶段含铁白云石的氧逸度约为 $\lg f_{O_2}=-33$；晚期方解石的氧逸度约为 $\lg f_{O_2}=-35$。因此，从主成矿阶段到晚阶段，氧逸度有降低的趋势，说明金的沉淀富集过程是氧逸度降低的过程。

pH 值不仅可以反映成矿流体的酸碱度，还影响着热液体系中各种化学反应以及矿质沉淀，pH 值可以通过包裹体成分含量和矿物共生组合的化

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 双王金矿流体包裹体成分特征(摩尔分数比值)

Table 5 The component characteristics of fluid inclusions from the Shuangwang gold deposit

样品编号	矿物	CO_2/H_2O	CH_4/CO_2	K^+/Na^+	F^-/Cl^-
3CM28 - 1	石英 (晚期)	0.189 415	0.008 712	0.013 694 975	0.011 411 833
3CM28 - 1	含铁白云石	0.456 032	0.002 984	0.012 517 263	0.011 539 949
3CM44 - 6	含铁白云石	0.210 752	0.008 825	0.011 834 260	0.007 447 325
4CM36 - 4	含铁白云石	0.116 268	0.013 743	0.010 271 708	0.012 989 962
4CM36 - 8	含铁白云石	0.105 692	0.028 253	0.016 153 246	0.031 604 143
4CM38 - 5	含铁白云石	0.082 015	0.014 941	0.011 147 369	0.009 017 442
1520CM75 - 1	方解石	0.419 294	0.008 004	0	0.628 203 798
1600CM75 - 1	方解石	0.110 719	0.005 415	0.006 412 973	0.621 029 606

注: 表内数据为表 3、表 4 内数据计算所得。

学平衡反应来进行计算[18]。双王金矿床的包裹体属于 CO_2-H_2O-NaCl 体系，故假设在此体系中存在 H_2O、H^+、OH^-、Na^+、Cl^-、NaCl、HCl、NaOH、HCO_3^-、H_2CO_3、CO_3^{2-} 和 $NaHCO_3$，并达到了总的质量平衡，从而计算得出成矿流体的 pH 值。由表 6 可以看出，主成矿期和晚期 pH 值变化不大，为 7.16 ~ 7.25，因此双王金矿床成矿流体属于中性—偏碱性流体。早期钠长石中的 pH 值为 6.8[20]，即从早期到晚期 pH 值略有升高，可能是不混溶作用消耗了大量的 CO_2 而造成的。

表 6 双王金矿床成矿流体 pH 参数

Table 6 pH value of ore-forming fluid of the Shuangwang gold deposit

样品	矿物	pH
3CM28 - 1	含铁白云石	7.25
3CM44 - 6	含铁白云石	7.22
4CM36 - 4	含铁白云石	7.21
4CM36 - 8	含铁白云石	7.23
4CM38 - 5	含铁白云石	7.21
1520CM75 - 1	方解石	7.17
1600CM75 - 1	方解石	7.16

3.6 成矿流体的来源

不同来源的流体，其氢、氧同位素组成特征也不同。前人对双王金矿床进行了大量的氢、氧同位素地球化学研究[1, 5, 20]。研究成果表明：早期钠长石的 δD_w 值为 -103.9‰ ~ -70.9‰，与之平衡的包裹体水的 $\delta^{18}O_w$ 值为 12.33‰ ~ 14.05‰。早期石英的 δD_w 值为 -92‰ ~ -71.6‰，与之平衡的包裹体水的 $\delta^{18}O_w$ 值为 13.27‰ ~ 15.84‰。主成矿期含铁白云石的 δD_w 值为 -76.7‰ ~ -60‰，与之平衡的包裹体水的 $\delta^{18}O_w$ 值为 7.3‰ ~ 13.04‰。晚期方解石的 δD_w 值为 -74‰ ~ -60‰，与之平衡的包裹体水的值为 -0.78‰ ~ 10.59‰。晚期石英的 δD_w 值为 -70‰ ~ -65‰，与之平衡的包裹体水的 $\delta^{18}O_w$ 值为 1.88‰ ~ 9.48‰。晚期石膏的 δD_w 值为 -32.6‰，与之平衡的包裹体水的 $\delta^{18}O_w$ 值为 -7.63‰。将以上矿物包裹体水的 δD_w 和 $\delta^{18}O_w$ 数据点投影到氢、氧同位素关系图[21]中(图 6)，可以看出早期钠长石和石英的值落于岩浆水右下方、变质水正下方区域；含铁白云石的值既有落于岩浆水范围内，也有落于变质水范围内，以及岩浆

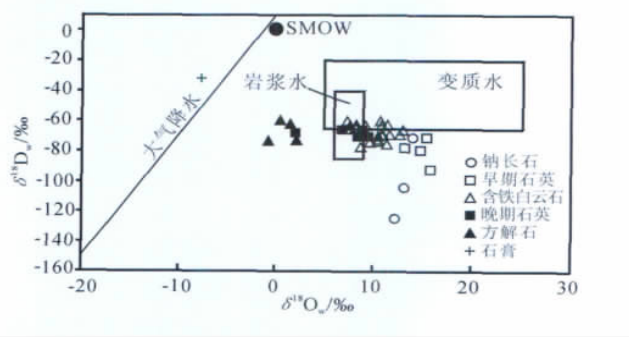


图 6 双王金矿床成矿流体的 $\delta^{18}O_w$—δD_w 图解

Fig. 6 Diagram showing $\delta^{18}O_w$ - δD_w of fluids from the Shuangwang gold deposit

钠长石、早期石英数据据石准立等(1989)[1]、王国富(2006)[20]；含铁白云石、晚期石英和方解石数据据本文、石准立等(1989)[1]、张作衡等(2004)[5]、王国富(2006)[20]；石膏数据据石准立等(1989)[1]

水的右侧；晚期石英的值大部分落于岩浆水中，1 个落于岩浆水和大气降水之间；晚期方解石的值 1 个落于变质水下方，1 个落于岩浆水，其余均落于岩浆水和大气降水之间；石膏的值落于大气降水线附近。以上特征表明了成矿热液以岩浆热液和变质热液的混合为主，后期有大气降水的混入。这与成分特征分析成矿流体具有热卤水性质，以及晚期成矿深度变浅或者成矿体系逐渐转变为开

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

放体系，并有大气降水的混入相对应。

4　讨　论

4.1　成矿热液的类型

金矿床大部分属于热液金成因，不同金矿床都有其独特的地质特征和成矿流体特征[22]。含多种子矿物的高温、高盐度包裹体和含子晶的富 CO_2 包裹体是浆控高温热液型矿床的关键性标志，在双王金矿床的含铁白云石和石英包裹体中发现了含铁白云石、石盐、黄铁矿、毒砂子矿物[2]；低盐度、富 CO_2 的流体包裹体是变质热液型矿床区别于其他类型矿床的重要标志[23]，而本次研究发现双王金矿床成矿流体盐度低(CO_2-H_2O-NaCl 包裹体的盐度为 2.58%　~　12.81% NaCleqv) 并且富含 CO_2。以上说明双王金矿床成矿热液具有浆控高温热液型和变质热液型的特征，成矿热液以岩浆水和变质水为主。

4.2　流体的不混溶性

不混溶性流体包裹体的特点是：CO_2-H_2O-NaCl 包裹体具有相同的均一温度范围；富 CO_2 包裹体和 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体中的 CO_2 具有相同的部分均一温度和完全均一温度(尽管富 CO_2 包裹体中难以观测到 H_2O，但约有 15% 体积百分比的水呈薄膜状粘附于包裹体壁上，由于包裹体边缘的内反射而不易观察) [24-26]；同一世代两个端元包裹体具有大致相同的均一温度，而且富气相的端元均一到气相、富液相的端元均一到液相[10]。

在显微镜下观察双王金矿床成矿流体包裹体时，同一视域中可观察到充填度相差很大的水溶液包裹体、纯 CO_2 包裹体和充填度相差很大的 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体。含铁白云石中 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体和纯 CO_2 包裹体具有大致相同的部分均一温度，分别为 17.6 ~ 27.1 ℃ 和 17.1 ~ 31.6 ℃。CO_2-H_2O-NaCl 包裹体的均一温度为 219.8 ~ 412.2 ℃，推测富 CO_2 包裹体的均一温度范围也大致如此。在含铁白云石中可见到大量充填度相差较大的水溶液包裹体，同一视域内充填度大于 70 % 和充填度小于 20% 的水溶液包裹体紧密共生，且均一温度也大致相同。在含铁白云石中同一视域范围内水溶液包裹体和 CO_2-H_2O-NaCl 包裹体这两个端元紧密共生，均一温度也有近似的区间，而且富气相的端元均一到了气相，富液相的均一到了液相。根据显微测温结果，再结合流体包裹体岩相学特征，得出双王金矿床成矿流体沸腾作用的温度范围比较宽，大致为 260 ~ 340 ℃。

在热液沸腾过程中，除了矿物中可捕获到沸腾包裹体群之外，热液沸腾过程中形成的矿石和岩石中往往也发育大量的角砾岩构造，这是沸腾包裹体存在的主要宏观证据[27-28]。在双王金矿床中，早期的钠长石常常被后期的含铁白云石、方解石等胶结；而后者被破碎后，往往又被更晚期的热液矿物所胶结，具有多次充填胶结的特点，即由多阶段热液活动所产生的钠长角砾岩。以上说明了双王金矿床主成矿期的流体包裹体具有不混溶性的特征。因此，根据显微测温得出的温度和压力即为成矿的温度和压力，即成矿温度为 260 ~ 340 ℃，成矿压力为 100 ~ 170 MPa。此外，含铁白云石中存在大量的沸腾包裹体表明气液热流体对角砾岩体的形成起到了重要作用[29]。

4.3　金的成矿作用

双王金矿床中多期次角砾岩的发育以及沸腾作用的温度范围较宽，暗示了沸腾作用可能多次发生。沸腾作用之初，矿物中捕获流体包裹体的盐度相对较低，但随着沸腾作用的进行，残余流体的盐度不断增高，矿物中可捕获含石盐子晶的多相包裹体。

导致金从成矿热液中沉淀的原因主要有温度或压力的改变、不同流体的混合作用、流体不混溶作用、水—岩反应(交代与蚀变等) 、有机质吸附作用等。其中，不混溶作用可以导致流体中部分气体的逸出，从而提高了金属元素的浓度而导致矿质因过饱和而沉淀。由于不混溶作用逸失的为 CO_2、H_2S 等酸性挥发分(CO_2 的逸失可使溶液的 pH 值升高，而 H_2S 的逸失会导致金的络合物不稳定) ，从而使金沉淀成矿[30]。本次研究中在双王金矿床早期石英和后期石英中未发现不混溶包裹体群，而石膏中发育气液比较小的水溶液包裹体和纯液相包裹体[1]，即成矿早阶段和晚阶段未见不混溶包裹体群的出现。2 号矿体内发育大量后期产物，而且 2 号矿体金矿化程度也较低，因此不混溶作用是双王金矿床金沉淀的重要原因。在不混溶作用过程中，局部流体盐度偏高，可捕获含石盐子晶的包裹体，随着流体向上运移，大气降水的作用增强，使得浅部流体盐度偏低，与双王金矿床成矿流体盐度从东向西略有降低相对应。流体盐度在空间上虽然略有降低，但变化范围不大，流体仍表现为中—低盐度的特征。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 结 论

通过本次对双王金矿床不同矿体、不同标高和不同穿脉中流体包裹体的研究，得出以下结论:

(1) 双王金矿床不同热液矿物中流体包裹体主要有水溶液包裹体、CO_2-H_2O-NaCl 包裹体、纯 CO_2 包裹体、含子晶的多相包裹体 4 种类型。

(2) 流体的性质为中—低盐度、中—高温、富含 CO_2 的流体，含有 N_2、CH_4 以及一些有机气体。阳离子以 Na^+ 为主，阴离子以 Cl^- 为主。

(3) 包裹体为不混溶的包裹体群，因此所测得的均一温度和压力即为成矿时的温度和压力，成矿温度主要为 220 ~ 340 ℃，从早期到晚期成矿温度逐渐降低; 成矿压力主要为 100 ~ 170 MPa。从矿区东部向西部，成矿压力有降低的趋势，尤其以 2 号矿体成矿压力的降低较为明显。从早期到晚期，成矿体系由封闭体系逐渐转变为开放体系。

(4) 不混溶作用是金沉淀的重要原因之一。双王金矿床主成矿阶段存在不混溶包裹体群，而早期和晚期未见不混溶包裹体群，与早期和晚期成矿性不佳对应，说明不混溶作用是导致双王金矿床金沉淀的重要原因。

参考文献:

[1] 石准立，樊硕诚，张文宣，等. 陕西双王金矿床地质特征及其成因 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社，1989: 1 - 129.

[2] 谢玉玲，徐九华，何知礼，等. 太白金矿流体包裹体中黄铁矿和铁白云石等子矿物的发现及成因意义 [J]. 矿床地质，2000，19(1): 54 - 60.

[3] 李惠，郑涛，汤磊，等. 陕西双王金矿床的原生叠加晕模式 [J]. 桂林工学院学报，2000，20(4): 327 - 333.

[4] 王国富，孙振家，彭恩生，等. 陕西双王金矿床角砾岩动力学成因探讨 [J]. 大地构造与成矿学，2002，26(1): 81 - 85.

[5] 张作衡，毛景文，李晓峰. 双王角砾岩型金矿床地质地球化学及成矿机制 [J]. 矿床地质，2004，23(2): 241 - 252.

[6] 胡西顺. 陕西双王金矿床成因的再认识 [J]. 黄金科学技术，2009，17(2): 17 - 27.

[7] 王宗起，闫全人，闫臻，等. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分 [J]. 地质学报，2009，83(11): 1527 - 1546.

[8] Mao J W，Qiu Y M，Goldfarb R J，et al. Geology，distribution，and classification of gold deposits in the western Qinling belt，central China [J]. Mineralium Deposita，2002，37: 352 - 377.

[9] 金勤海，鞠党辰. 陕西太白南部西坝复式岩体的成因及其与双王金矿床的关系 [J]. 现代地质，1990，4(4): 65 - 76.

[10] 石准立，刘瑾璇，鞠党辰，等. 双王—二台子型金矿床地质特征和成矿机制探讨 [M] //沈阳地质矿产研究所. 中国东部金矿地质研究文集 4: 秦岭东部地区. 北京: 地质出版社，1993: 35 - 68.

[11] 卢焕章，范宏瑞，倪培，等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社，2004: 11 - 439.

[12] Collins P L F. Gas hydrates in CO_2-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity [J]. Economic Geology，1979，74(6): 1435 - 1444.

[13] Shepherd T J，Rankin A H，Alderton D H M. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies [M]. Blackie: Chapman Hall，1985: 1 - 239.

[14] Schwartz M O. Determining phase volumes of mixed CO_2-H_2O inclusions using microthermetric measurements [J]. Mineralium Deposita，1989，24: 43 - 47.

[15] 杨艳，张静，刘家军，等. 河南汤家坪钼矿床流体成矿作用研究 [J]. 中国地质，2008，35(6): 1240 - 1249.

[16] 徐九华，谢玉玲，申世亮. 热液金矿床控矿断裂性质与成矿流体的物理化学 [J]. 地球学报，1998，19(2): 204 - 209.

[17] 李晶，陈衍景，李强之，等. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型 [J]. 岩石学报，2007，23(9): 2144 - 2154.

[18] 卢焕章，李秉伦，沈昆. 包裹体地球化学 [M]. 北京: 地质出版社，1990: 151 - 159.

[19] 刘斌，沈昆. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社，1999: 1 - 277.

[20] 王国富. 陕西双王金矿床构造成矿作用及成矿预测研究 [D]. 长沙: 中南大学，2006: 1 - 115.

[21] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Economic Geology，1974，69: 843 - 883.

[22] 陈衍景，倪培，范宏瑞，等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征 [J]. 岩石学报，2007，23(9): 2086 - 2108.

[23] 张静，陈衍景，李国平，等. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型 [J]. 矿物岩石，2004，24(3): 1 - 7.

[24] Hollister L S. Enrichment of CO_2 in fluid inclusions in quartz by removal of H_2O during crystal plastic deformation [J]. Journal of Structural Geology，1990，12(7): 895 - 901.

[25] Oslen S N. High density CO_2 inclusions in the Colorado Front Range [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology，1988，100(2): 226 - 235.

[26] Ramboz C，Pichavant M，Weisbrod A. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. Ⅱ. Interpretation of fluid inclusion data in term of immiscibility [J]. Chemical Geology，1982，37(1/2): 29 - 48.

[27] 顾雪祥，刘丽，董树义，等. 山东沂南金铜铁矿床中的液态不混溶作用与成矿: 流体包裹体和氢氧同位素证据 [J]. 矿床地质，2010，29(1): 43 - 57.

[28] 谢广东. 热液沸腾作用与金矿化的关系及其找矿意义 [J]. 地质科技情报，1993，12(3): 61 - 67.

[29] 李胜荣，邵克忠. 河南嵩县祁雨沟金矿床石英流体包裹体标型 [J]. 现代地质，1991，5(4): 415 - 422.

[30] 张德会. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义 [J]. 地球科学进展，1997，12(6): 546 - 552.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net