

汉阴北部吴家湾金矿地质特征 及流体包裹体研究

闫馨云¹, 焦建刚^{1,2,3*}, 董一博¹, 祁东¹, 冷馨¹, 刘超¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:吴家湾金矿是汉阴北部地区的一个重要的金矿床, 处于南秦岭石泉-神河韧性滑脱逆冲推覆带。对其进行野外地质研究发现, 吴家湾金矿赋矿层位为梅子垭组第一岩性段第四岩性层($S_1m_1^4$), 岩性主要为含碳绢云片岩夹硅质岩; 控矿构造主要为 RFa 和 RFb 2 条顺层韧性剪切带, 大致可分辨出 S_1 、 S_2 及 S_3 3 期构造面理, S_0 几乎全部被置换, S_2 期变形与金矿成矿关系密切, 金矿体主要于该期形成的韧性剪切带中产出。在地质研究基础上, 可将吴家湾金矿区石英脉划分为 3 期, 对流体包裹体的研究表明, 包裹体类型以气液两相包裹体为主, 纯气相、纯液相及三相包裹体较少见; 均一温度范围介于 176.8~344.4℃, 集中于 230~280℃。盐度范围为 0.35%~13.51%, 集中于 2%~10%, 成矿流体属于中-低温、低盐度流体。流体捕获深度在 1.38~3.47 km, 集中于 1.5~2.8 km, 于中浅部成矿。 S_2 期石英脉流与成矿关系紧密, 流体包裹体均一温度主要集中在 240~280℃, 为主成矿期流体。激光拉曼光谱分析表明气液两相包裹体液相成分以 H_2O 为主, 含少量 CO_2 和 CH_4 ; 气相成分主要为 CO_2 , 其次为 CH_4 、 N_2 及 H_2S ; 包裹体类型主要为富含 CO_2 的 H_2O-CO_2 体系包裹体。对汉阴北部不同地区流体包裹体的性质进行对比研究后发现, 流体包裹体均一温度为 190~260℃, 盐度为 6%~10%, 在这个区间内有利于成矿。

关键词:南秦岭; 吴家湾金矿; 流体包裹体; 找矿方向

中图分类号: P624; P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)04-0182-12

Geological Characteristics and Fluid Inclusions of the Wujiawan Gold Deposits in Northern Hanyin, Shaanxi

YAN Xinyun¹, JIAO Jiangan^{1,2,3*}, DONG Yibo¹, QI Dong¹, LENG Xin¹, LIU Chao¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an, 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Wujiawan gold deposit is an important gold deposit in northern Hanyin, Shaanxi. It is located at the Shiquan-Shenhe thrust-napped ductile shear zone in South Qinling. The field geological study found that the ore-bearing horizon of the Wujiawan gold deposit is the fourth li-

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-08-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目“中酸性小岩体岩浆作用与成矿”(300102278401), 国家自然科学基金资助项目“阿拉善成岩成矿”(211027160237)联合资助的成果

作者简介: 闫馨云(1995-), 女, 硕士研究生, 现主要从事矿床学及地球化学研究工作。E-mail: yanxinyun@chd.edu.cn

* 通讯作者: 焦建刚(1976-), 男, 教授, 主要从事矿床学研究与教学。E-mail: jiangang@chd.edu.cn

thological layer ($S_1 m_1^1$) of the first lithology section of the Meiziya Formation, and this layer is mainly composed of carbon-bearing sericite schist with siliceous rocks; The structure is mainly composed of two layer ductile shear zones (RFa and RFb), which can roughly distinguish the three-phase structural facies of S_1 , S_2 and S_3 . In which, S_0 is almost completely replaced, and S_2 deformation is closely related to gold mineralization. Gold ore body was mainly formed in the ductile shear zone during S_2 deformation. Based on geological research, the quartz veins from the Wujiawan Gold Mine can be divided into three phases. The study of fluid inclusions shows that these inclusions are dominated by gas-liquid two-phase inclusions, with rare pure gas phase, pure liquid phase and three-phase inclusions. Their homogeneous temperatures range from 176.8°C to 344.4°C, which is concentrated at 230~280°C. Their salinity vary from 0.35 wt% to 13.51 wt% and are concentrated in 2~10 wt%. The ore-forming fluid belongs to medium-low temperature and low salinity fluid. The fluid capture depth is 1.38~3.47 km and is concentrated at 1.5~2.8 km, and the mineralization is occurred in the middle and shallow parts. The fluid inclusions of quartz vein in S_2 stage are closely related to mineralization, their homogeneous temperatures are mainly concentrated at 240~280°C, which are the fluid in the main ore-forming period. Laser Raman spectroscopy analysis shows that the liquid phase composition of gas-liquid two-phase inclusions is dominated by H_2O , containing a small amount of CO_2 and CH_4 . The gas phase components are mainly CO_2 , followed by CH_4 , N_2 and H_2S . The inclusion types are mainly H_2O-CO_2 system inclusions with rich CO_2 . Compared to the properties of fluid inclusions in different areas of northern Hanyin, it is found that the homogeneous temperatures of fluid inclusions range from 190°C to 260°C, and their salinities vary form 6 wt% to 10 wt%, which are beneficial to mineralization.

Keywords: South Qinling; Wujiawan gold deposit; fluid inclusion; prospecting direction

秦岭处于华北板块与扬子板块结合部位,在特有的构造环境下形成了种类繁多的矿产资源,在中国的多金属成矿带中占有重要地位。本次研究区所在的汉阴北部山区,就位于秦岭造山带南部。前人已经在这里发现了石泉县羊坪湾-汉滨区流芳大型金矿化集中区,其东西向延伸约 100 km,南北向展布 0~20 km(杨本昭等,2010;杜坚等,2014),吴家湾金矿床是该矿集区内一个非常重要的金矿床。笔者主要研究了吴家湾金矿床石英脉中流体包裹体岩相学、流体包裹体地球化学等特征,在室内对剖面上流体包裹体的性质进行系统研究。最后将本次研究成果与前人对汉阴北部地区金矿的流体包裹体的研究成果进行对比分析。对整个汉阴北部的流体包裹体性质完成由点到面的研究,以期发现包裹体特征与成矿存在的联系,为汉阴北部地区找矿提供更多理论依据。

1 区域地质背景

汉阴北部金矿田从构造单元划分属于南秦岭多层次韧性滑脱逆冲推覆褶皱带,该构造带由南向北

又细分出紫阳-平利、石泉-神河及旬阳-镇安韧性滑脱逆冲推覆带(李福让等,2009;杜坚等,2014)。研究区就处于石泉-神河韧性滑脱逆冲推覆带,该带南北向分别以月河断裂及麻坪河断裂为界,为一北西向倒转复背向斜。卷入地层主要为早古生界沉积的一套碳质、泥质碎屑岩,碳酸盐岩、碳硅质岩建造。带内主要变形有顺层韧性剪切、顺层流劈理褶、叠层构造及紧闭褶皱等。本区经历了前印支期的伸展滑脱构造作用、印支期的南北向挤压作用和燕山期的一期规模较小的变形作用。其中,印支期的挤压作用导致了区内主要的变形及变质作用(高雅宁等,2016;韩珂等,2018)。区内基底地层为中元古界的火山岩建造,上覆寒武-志留系的一套海相及潮坪相硅质岩、碳酸盐岩及细碎屑岩建造,构造主要有月河断裂、牛山复背斜及一系列韧性剪切带。前人在这里主要划分出了 RF1~RF5 共 5 条区域性韧性剪切带(吴闻人等,1991),区内大部分金矿都产出于这 5 条韧性剪切带内。吴家湾金矿位于金矿田南部,RF5 韧性剪切带附近,带内还发现有黄龙、长沟、鹿鸣、沙沟及柳坑等金矿床。

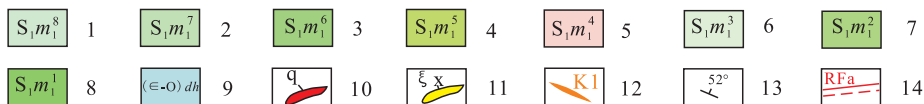
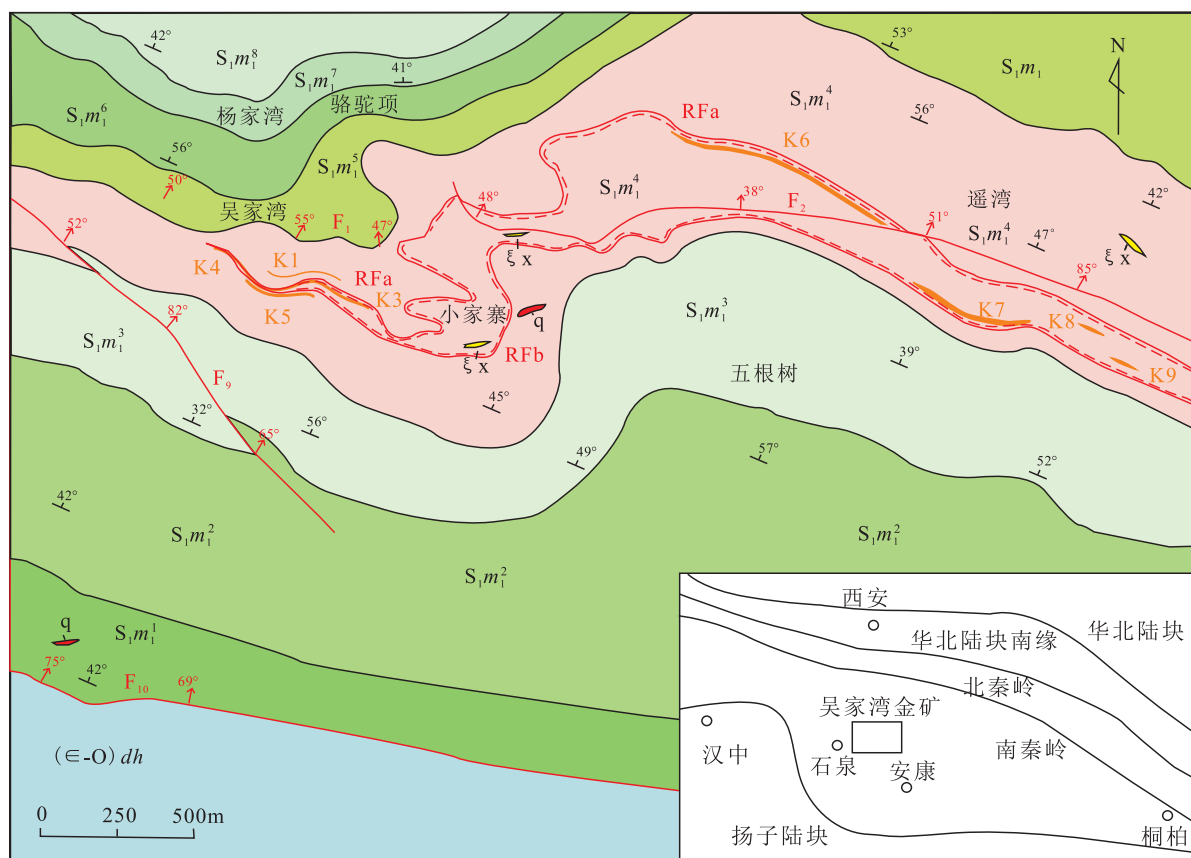
2 矿区地质特征

吴家湾金矿位于长沟-鹿鸣金矿以南,沙沟-柳坑金矿以北,且与二者都十分接近,距离最远的柳坑金矿也不超过4 km。东起遥湾,西至边罗公庙,东西向延伸约4.0 km;北起磨子湾,南至鹿鸣山,南北向展布约2.0 km,面积为10.79 km²。

2.1 矿区地层

吴家湾金矿区出露地层有寒武—奥陶系洞河群(CO)dh和下志留统梅子垭组第一岩性段(S₁m₁),主体为一套浅变质泥质岩夹少量细碎屑岩、硅质岩,呈现出变质较浅但变形较强的特征,片理化程度高

且揉皱较发育,地层整体呈北西—南东向展布,倾向以北北东为主,二者呈不整合接触(图1)。洞河群分布于矿区南部,岩性主要为二云母钠长片岩、细砂岩、粉砂岩等,地层倾向为13°~35°,倾角为3°~48°,总厚度大于450 m;下志留统梅子垭组第一岩性段(S₁m₁)分布于矿区北部,是区内主要赋矿地层。岩性为绢云石英片岩、含碳黑云母变斑晶绢云石英片岩、含碳绢云片岩、硅质岩等。根据其岩性变化特征又将其细分为8个岩性层(S₁m₁¹—S₁m₁⁸)。金矿主要赋存于第四岩性层(S₁m₁⁴),其倾向为20°~315°,倾角为3°~350°,总厚度约100 m,岩性为灰黑色含碳绢云片岩夹硅质岩,金矿体主要产于片岩与硅质岩接触部位。



1. 梅子垭组第一岩性段第八层;2. 梅子垭组第一岩性段第七层;3. 梅子垭组第一岩性段第六层;4. 梅子垭组第一岩性段第五层;5. 梅子垭组第一岩性段第四层;6. 梅子垭组第一岩性段第三层;7. 梅子垭组第一岩性段第二层;8. 梅子垭组第一岩性段第一层;9. 寒武—奥陶系;10. 石英脉;11. 云煌岩脉;12. 金矿体;13. 岩层产状;14. 韧性剪切带及编号

图1 吴家湾金矿矿区地质图(据祁东,2015)

Fig. 1 Geological map of the Wujiawan gold deposit (after Jidong, 2015)

2.2 矿区构造

2.2.1 矿区面理期次划分

矿区内地层变形较强烈,大致可识别出 S_1 、 S_2 、 S_3 共 3 期构造面理。未受构造作用影响的原生层理 S_0 几乎全部被置换, S_1 、 S_2 期面理较发育, 少见 S_3 期面理。① S_1 面理对 S_0 层理的置换: 本期变形以 S_0 为变形面理, 发生塑性流变变形, 形成顺层透入性面理 S_1 , S_0 近乎全部被 S_1 面理置换, 可见沿 S_1 面理绢云母、黑云母等矿物定向排列。② S_2 面理对 S_1 面理的置换: 本期变形以 S_1 面理为变形面理, 在挤压体制下发生韧性变形, 形成透入性面理 S_2 , 同期分泌石英英脉及韧性剪切带等。可见沿 S_2 面理云母、石英等矿物被拉长且定向排列, 本期变形与金矿成矿关系密切, 金矿体主要于该期形成的韧性剪切带中产出。③ S_3 面理对 S_2 面理的置换: 本期变形以 S_2 面理为变形面理, 叠加于前 2 期变形之上。

2.2.2 控矿构造

RFa 和 RFb 为研究区一组近同期形成的顺层韧性剪切带, 是吴家湾金矿床重要的控矿构造之一, 金矿体主要于剪切带上下盘产出。RFa 和 RFb 大体分布于区内硅质岩的顶底板接触部位, 剪切带上下盘岩石均发生强烈的变形, 次生构造发育, 可见揉皱、劈理、Z 字形构造和石香肠构造等。同时发育多期石英脉透镜体, 可能是由于多期构造作用或应力方向的变化导致的。带内蚀变强烈, 硅化、绿泥石化、褐铁矿化、绢云母化发育。

矿区构造活动强烈, 岩石大都受到挤压变形, 产生了一系列近东西向的次级断层及大量次级揉皱。 F_0 断层为一区域性的大断层, 呈北西—南东向展布于木墙沟—罗家瓦屋一带, 出露总长大于 5 km, 产生破碎带宽约 5~20 m, 断层倾向 $2^\circ\sim 51^\circ$, 倾角 $48^\circ\sim 82^\circ$, 该断层错断了 $S_1 m_1^+$ 、 $S_1 m_1^+$ 等地层; F_1 断层分布于枣树沟—罗家瓦屋一带, 向东于枣树沟附近被 F_2 断层截断, 出露总长约 1.7 km, 产生破碎带宽约 5~20 m, 断层倾向 $15^\circ\sim 350^\circ$, 倾角约 $50^\circ\sim 55^\circ$, 断层附近片理及揉皱发育; F_2 断层展布于黄家湾—瑶湾一带, 出露总长约 2 km, 产生破碎带宽约 1.5~15 m, 断层倾向 $20^\circ\sim 350^\circ$, 倾角约 $45^\circ\sim 65^\circ$, 断层附近揉皱发育, 可见构造角砾岩。

2.3 矿体地质特征

根据采样分析及探槽工程验证, 在吴家湾金矿区发现了 9 个金矿体 (K1—K9)。其中 K1—

K5 与 K6—K9 分属西矿段 (小家寨矿段) 与东矿段 2 个矿段。矿体均赋存于梅子垭组第一岩性段第四岩性层 ($S_1 m_1^+$) 中, 其岩性主要为灰黑色含碳绢云片岩夹硅质岩; 金矿体主要产出于 RFa 及 RFb 韧性剪切带的上下盘, 地表出露长度 100~700 m 不等, 矿体厚度为 2.30~2.82 m。其中, K5、K6、K7 金矿体地表出露均超过 500 m; 金矿体出露地表蚀变类型以硅化、绢云母化、碳化及黄铁矿化为主。

2.4 矿石地质特征

矿石中矿石矿物主要有自然金、黄铁矿、褐铁矿及磁黄铁矿等, 同时还含有少量黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿、钛铁矿、毒砂等, 金属矿物含量小于 8%; 脉石矿物主要有石英、黑云母、白云母、绢云母等, 还有少量石榴子石、斜长石、微量方解石、磷灰石、电气石、绿泥石、绿帘石、黝帘石。

矿石结构以他形—半自形粒状变晶结构及鳞片变晶结构为主, 少量矿石可见包含结构、变斑状结构、次生交代结构及交代残余结构。矿石构造以浸染状构造为主, 明显可见载金硫化物沿岩石裂隙、片理呈浸染状分布, 其次可见细脉状、网脉状、条带状、片状及团块状构造。

金的形态不一, 有不规则状、粒状、块状等, 粒度较大, 以中粗粒 (> 0.03 mm) 为主, 约占总量的 40%, 细粒金 (0.015~0.03 mm) 及显微金各占 30%。主要以粒间金的形式赋存于石英与石英、石英与白云母、石英与硫化物及硫化物的粒间。其次还有裂隙金, 主要产出于石英脉裂隙中, 很少见到包裹金。

2.5 围岩蚀变特征

矿区内围岩蚀变类型主要有硅化、黄铁矿化、黑云母化、绢云母化、碳化及碳酸盐化等, 其中硅化、黄铁矿化、黑云母化及碳化与矿化关系密切。

硅化可分为 3 期: 晚期硅质呈网脉状沿裂隙交代填充 (图 2a), 与矿化联系密切; 中期沿裂隙形成细脉状、眼球状、团块状石英, 脉体中少见硫化物, 偶见明金; 前期硅质呈隐晶质交代原岩, 与矿化无明显联系。黄铁矿化呈 3 种类型, 黄铁矿于石英脉边部或围岩中呈星点状产出时含金性最佳; 于围岩中呈立方体产出时含金性差; 于岩石裂隙、片理及矿物粒间呈细脉状产出时含金性差 (图 2b)。黑云母化有 2 种类型, 一种是热液蚀变形成的黑云母, 晶体与基质界面清晰, 与石英脉、黄铁矿伴生, 接近石英脉时常

与金矿化伴生(图 2c);另外一种属于区域变质作用下形成的黑云母,晶体与基质呈过渡接触,与矿化无

关。碳化主要形成灰黑色-黑色条带状碳质片岩(图 2d)。



a. 硅化;b. 黄铁矿化;c. 黑云母化;d. 碳化;e、f、g. 石英脉粒间明金

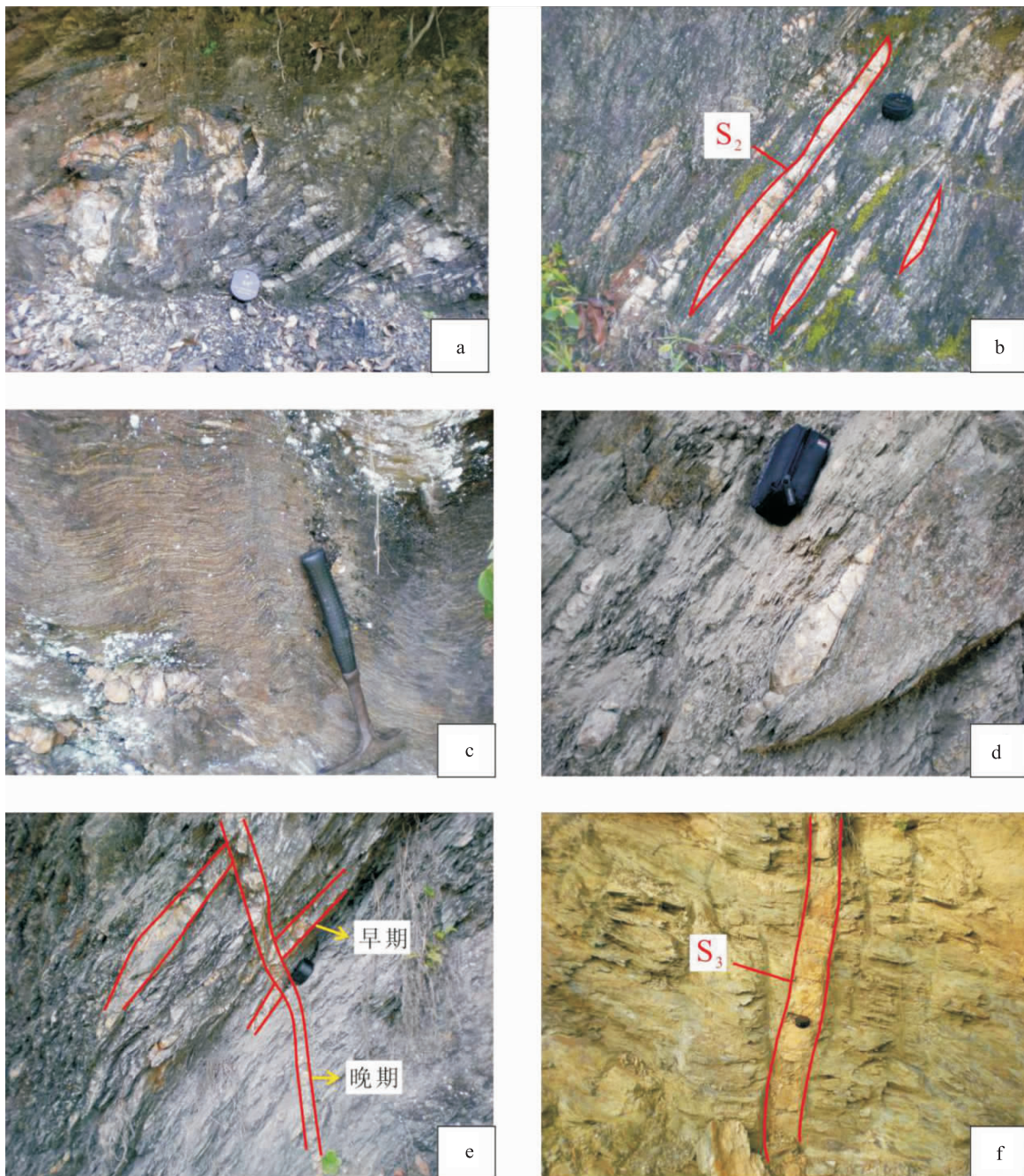
图 2 吴家湾金矿区蚀变特征及石英脉粒间明金照片

Fig. 2 Characteristics of surrounding rock alteration of Wujiawan gold deposit and quartz vein intergranular gold

2.6 矿区石英脉特征

通过野外对石英脉的颜色、产状及相互切穿关系等特征进行观察,可将吴家湾矿区石英脉大致分为 3 个期次: S_1 期石英脉,颜色呈乳白色,变形较为严重,主要顺 S_1 面理产出,与 S_2 面理近平行或斜交,其形成时间早,且在矿区内出露不多,与金矿化关系

不大。 S_2 期石英脉,颜色呈烟灰色,形态呈雁列脉状或透镜状,主要顺 S_2 面理产出,脉体中多见黄铁矿,发现少量金颗粒。 S_3 期石英脉数量较少,主要顺 S_3 面理产出,或沿一些脆性裂隙产出。矿区内多见 S_2 期及 S_3 期石英脉, S_2 期石英脉与金矿化关系较密切(图 3)。



a. 硅质岩中的石英脉; b. S_2 期石英脉; c. 拔丝状石英细脉; d. 石英透镜体; e. 晚期石英脉错断早期石英脉; f. S_3 期石英脉

图 3 吴家湾金矿区石英脉产出特征照片

Fig. 3 Characteristics of quartz vein output in Wujiawan gold deposit

2.7 石英脉与金矿化关系

矿区内石英脉主要产于强变形带及硅质岩带中,产出形式主要有透镜体、条带状、细脉状及网脉状等。同时石英脉出现的区域也常是强变形带、碳化带及黑云母变斑晶带等,这些蚀变带与金矿化联系十分紧密。部分地区可于石英颗粒或粒间见到明金(图 2e、图 2f、图 2g),此类石英脉一般呈烟灰色。石英脉也是区内十分重要的载金矿物,与金矿化关系密切,可作为重要的控矿因素之一。

3 流体包裹体研究

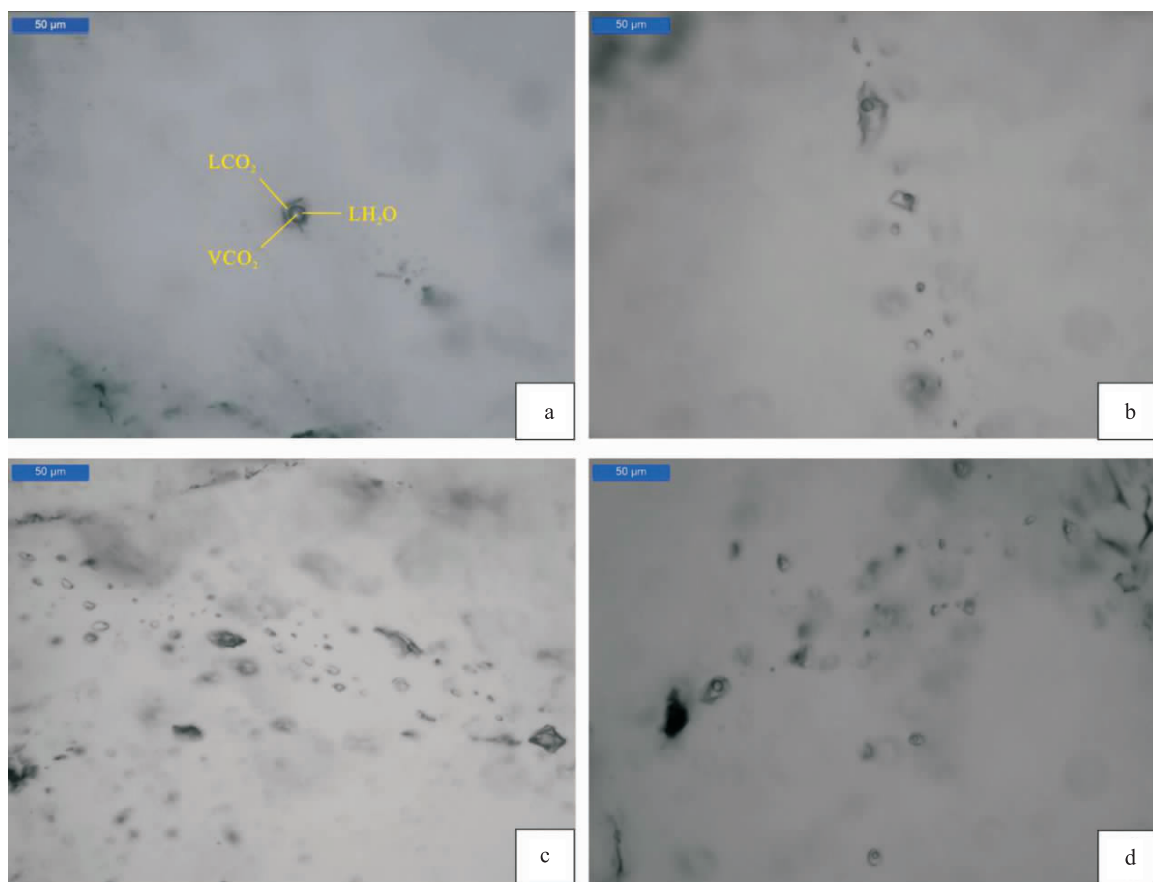
3.1 流体包裹体特征

通过镜下观察,吴家湾金矿流体包裹体数量较多,大体可以分出原生、次生及假次生 3 类包裹体。原生包裹体最为常见,主要发育于石英生长裂隙,成群或孤立产出,大小一般处于 $2\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$

$\times 10\ \mu\text{m}$;次生包裹体主要于石英脉后期所产生的细小裂隙中发育,体积较小,大都小于 $2\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$;假次生包裹体发育于石英内部的一些细微裂隙中,数量较少,大小处于 $2\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。流体包裹体类型以气液两相包裹体为主,单相及三相包裹体较少见。流体包裹体形态以椭圆状及长条状为主,还有部分呈近圆状及不规则状。 S_1 期石英脉中并未发现矿化现象,故而着重研究 S_2 期石英脉及 S_3 期石英脉(图 4)。

3.2 均一温度与盐度

经过对吴家湾金矿区 2 期石英脉中的流体包裹体进行的岩相学研究,从样品中挑选出 4 件代表性较强的包裹体样品,对样品中的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 型包裹体进行了显微测温实验,实验完成于长安大学西部重点实验室,实验仪器采用了 LinkamTHMS-600 型冷热台。均一温度的测定升温直至气泡消失,气液两相界限完全消失。冰点温度的测定主要通过



a. 三相包裹体孤立产出;b. 沿矿物裂隙产出的包裹体;c. 群生包裹体;d. 散乱分布的包裹体

图 4 吴家湾金矿石英脉中流体包裹体特征照片

Fig. 4 Characteristics of fluid inclusions in quartz veins of Wujiawan gold deposit

包裹体进行降温,待包裹体内流体全部凝固后对包裹体进行升温,观察到包裹体中气泡发生运动,即可认为冰晶全部消失,此时的温度为冰点温度,再利用冰点-盐度的换算公式(卢焕章等,2004)来确定盐度。

通过对流体包裹体进行显微测温研究,测得研究区石英脉样品中的流体包裹体均一温度为 176.8~344.4℃,峰值为 180~210℃、230~290℃及 310~330℃,主要集中于 230~290℃(图 5)。代表吴家湾金矿成矿流体属于中低温热液,同时多个均一温度峰值也表明矿区内曾发生了多期的热液活动。单从 WJW-6 石英脉样品来看(图 6),该石英脉在形成过程中分别于 320℃、260℃及 190℃上下各经历了一次热液活动,共经历至少 3 期热液活动。S₂与 S₃期石英脉中流体包裹体的均一温度分别集中于 240~280℃和 260~290℃,其均一温度峰值分别为 250℃与 270℃,S₂期的均一温度较 S₃期略低。

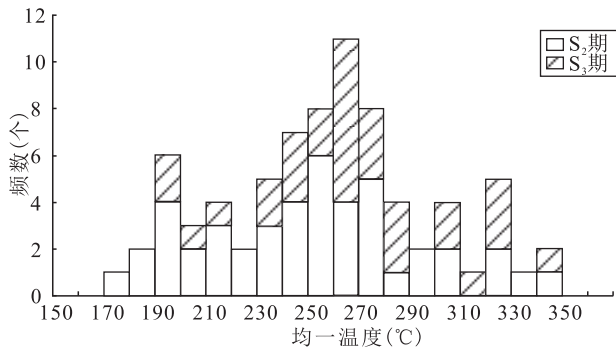


图 5 所有样品的均一温度直方图

Fig. 5 Homogeneous temperature histogram of all samples

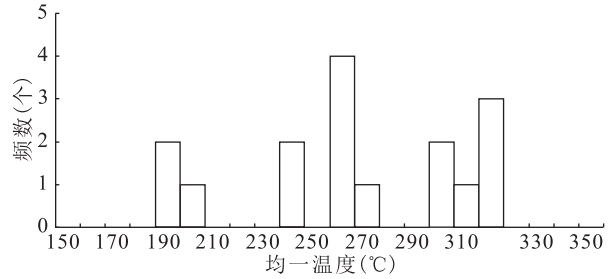


图 6 样品 W-6 均一温度直方图

Fig. 6 Sample W-6 Homogeneous temperature histogram

盐度利用冰点温度与盐度换算公式(卢焕章等,2004)来计算,换算公式为: $S = 0.00 + 1.78T - 0.0442T^2 + 0.000557T^3$,适用盐度(NaCl)为 0%~23.3%。

式中:S代表盐度(wt%),T为冰点温度(℃)。

根据本次研究实验数据,流体包裹体的冰点温度为-9.6~-0.2℃,根据上述盐度计算公式得到包裹体盐度范围为 0.36%~13.55%,集中于 2%~10%,代表成矿流体属于低盐度流体。其中 S₂期石英脉中流体包裹体盐度主要集中于 2%~10%,S₃期石英脉流体包裹体盐度主要集中于 3%~8%,总体上 S₂期石英脉中流体包裹体盐度与 S₃期相差不大。根据李福让(2009)所测,S₁期石英脉流体包裹体均一温度集中于 153~218℃,峰值温度为 210℃;盐度主要集中于 1.7%~15.3%,与前 2 期石英脉包裹体相区别,均一温度明显较低,而盐度较高,与矿区内主要成矿温度及盐度存在明显的差别(表 1)。

表 1 吴家湾金矿区 H₂O-CO₂型包裹体特征参数表

Tab. 1 Characteristic Table of H₂O-CO₂ Type Inclusions in Wujiawan Gold deposit Area

样号	寄主矿物	大小(μm)	气液比(%)	均一温度(℃)	冰点(℃)	盐度(wt%)	期次	数据来源
WJW-5	石英	2×2~3×5	5~15	188.4~293.6	-6.2~-0.2	0.35~9.47	S ₂	本次研究
WJW-8-2	石英	1×2~10×15	5~30	176.8~342.5	-8.9~-0.6	1.05~12.73	S ₂	本次研究
WJW-6	石英	1×5~5×8	5~30	194~325.9	-9.6~-0.5	0.88~13.51	S ₃	本次研究
WJW-8-1	石英	2×3~6×10	10~25	233.4~344.4	-7.7~-0.7	1.22~11.34	S ₃	本次研究
S-7,S-108,S-118	石英	\	\	153~218℃	1.7~15.3	1.7~15.3	S ₁	李福让(2009)

3.3 压力与深度

在得到包裹体的深度及盐度后,可根据流体压力经验公式(邵洁涟等,1986)估算压力。

$$P(0.1 \text{ Mpa}) = P_0 \times T_h / T_0$$

式中:T_h为均一温度(℃);W为盐度(NaCl%);
 $P_0 = 219 + 2620 \times W$; $T_0 = 374 + 920 \times W$ 。

将包裹体均一温度及盐度带入上述公式可以得

到每个样品的压力范围(表 2)。流体捕获压力范围为 38.04~95.38 MPa,其中 S₂期包裹体流体捕获压力为 38.04~92.73 MPa,S₃期包裹体流体捕获压力 43.02~95.38 MPa。

若认为压力为静岩压力,以深度每增加 1 km 压力增大 27.5 MPa 可估算出流体包裹体的捕获深度(高雅宁等,2017;杨龙伟等,2018)。根据计算结

果(表2),流体包裹体捕获深度为1.38~3.47 km,主要集中于1.5~2.8 km; S_2 期包裹体捕获深度为1.38~3.37 km; S_3 期包裹体捕获深度为1.56~3.47 km;流体属于中-浅成热液。李福让(2009)计算得到 S_1 期包裹体捕获压力及深度与前2期相比明显偏低,与区内估算的成矿压力及深度有一定的差距,佐证了 S_1 期石英脉与成矿关系不大的认识。

表2 成矿压力及深度表

Tab.2 Metallogenic pressure and depth

样号	寄主矿物	压力(Mpa)	深度(km) (静岩压力)	期次	数据来源
W-5	石英	38.04~80.88	1.38~2.94	S_2	本次研究
W-8-2	石英	41.33~92.73	1.50~3.37	S_2	本次研究
W-6	石英	43.02~88.43	1.56~3.22	S_3	本次研究
W-8-1	石英	54.02~95.38	1.96~3.47	S_3	本次研究
S-7、S-108、 S-118	石英	10.00~65.00	0.37~2.41	S_1	李福让 (2009)

3.4 流体包裹体成分分析

流体包裹体成分分析采用激光拉曼光谱分析技术,实验完成于西安地质矿产研究所实验测试中心,仪器采用英国 Renishaw inVia 激光拉曼探针。本

次研究从4件石英脉流体包裹体薄片样品中挑选出11个代表性较好的流体包裹体进行实验,实验测得流体包裹体激光拉曼图谱见图7,气液相成分见表3。

通过激光拉曼谱图(图7),可以十分直观地可看出吴家湾金矿区石英脉中流体包裹体的气液相成分并不单一。 S_3 期包裹体(WJW-8-1-1、WJW-6-1)液相成分主要为 H_2O ,气相成分主要为 CO_2 及 CH_4 。 S_2 期包裹体(WJW-8-2-3、WJW-5-1-2)液相成分主要为 H_2O ,同时含有一定量 CH_4 ,气相成分包含 CO_2 、 CH_4 和 N_2 。

进一步对表3数据进行分析后可以发现,所测包裹体的液相成分近乎全部为 H_2O ,大多数包裹体 H_2O 的占比达99%以上,其次含少量 CO_2 和 CH_4 ,同时也存在液相成分以 CO_2 为主的包裹体。而气相成分相对较复杂,大多数包裹体 CO_2 气相占比达60%以上,整体上以 CO_2 为主;其次为 N_2 ,气相占比大都高于30%; CH_4 气相占比半数小于10%;同时还有少量 H_2S 的存在。总体上来看吴家湾金矿流体包裹体类型以富含 CO_2 的 H_2O-CO_2 体系包裹体为主,同时有少量气液两相 CO_2 含量均达90%的富 CO_2 包裹体存在。

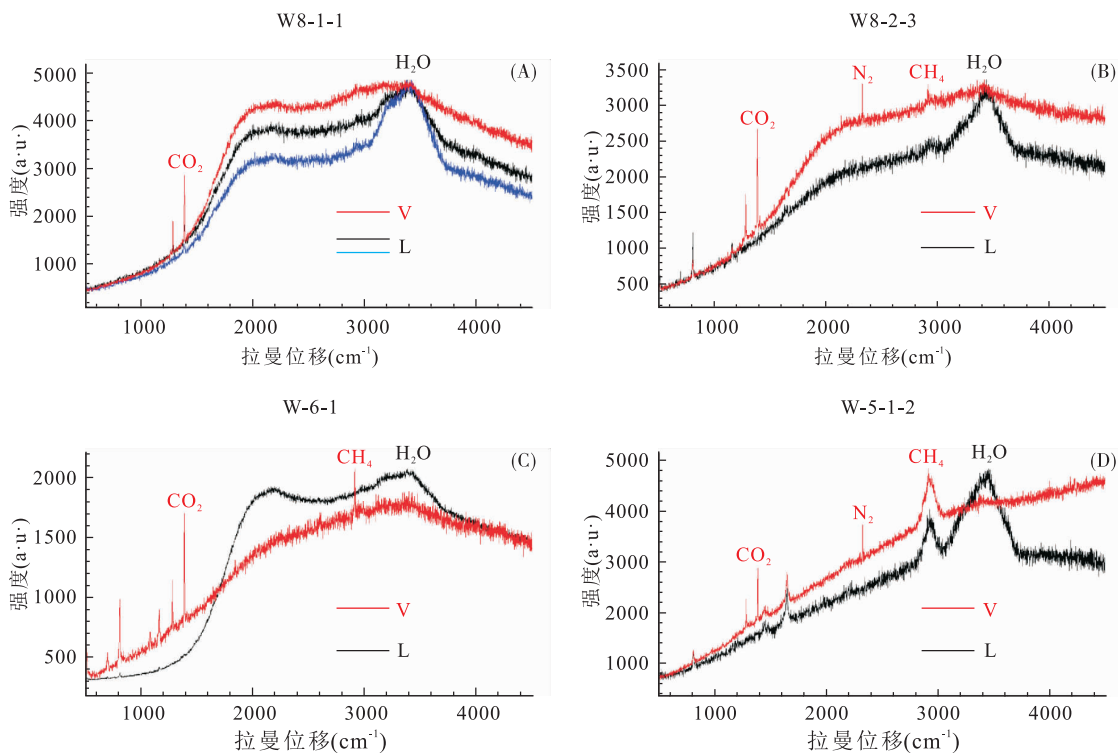


图7 吴家湾金矿流体包裹体拉曼测试谱图

Fig.7 Laser Raman Test Spectra of Fluid Inclusions in Wujiawan Gold deposit

表3 吴家湾金矿流体包裹体气液相成分表

Tab. 3 Wujiawangold deposit gas-liquid composition of fluid inclusions table

试样编号	送样编号	气相/液相(%)						
		CO ₂	H ₂ S	CH ₄	H ₂ O	N ₂	H ₂	总和
R140170001	WJW-8-1-1	89.6/98.08	/	2.1/1.92	/	6.7/0	1.6/0	100.0
R140170002	WJW-8-1-2	0/0.02	/	6.7/0	0/99.98	88.8/0	4.5/0	100.0
R140170003	WJW-8-2-1	60.7/0.20	1.6/0	10.3/0.03	0/99.77	27.5/0	/	100.0
R140170004	WJW-8-2-3	70.4/0	0.6/0	2.4/0.06	0/99.94	26.5/0	/	100.0
R140170005	WJW-8-2-2	66.0/0.29	/	2.5/0.01	0/99.70	31.5/0	/	100.0
R140170006	WJW-8-2-1-2	65.6/0.29	/	4.9/0	0/99.71	29.5/0	/	100.0
R140170007	WJW-6-1	72.0/0.14	3.9/0	13.4/0.02	0/99.84	10.7/0	/	100.0
R140170008	WJW-5-1-1	54.4/0.27	/	17.5/0.32	0/99.41	28.1/0	/	100.0
R140170009	WJW-5-1-2	43.5/0.08	1.6/0	20.7/0.09	0/99.84	34.2/0	/	100.0
R140170010	WJW-5-2-1	77.6/0	/	4.5/0.01	0/99.99	17.9/0	/	100.0
R140170014	WJW-5-2-2	/	/	46.1/0.02	0/99.98	53.9/0	/	100.0

4 讨论

4.1 吴家湾金矿成矿流体性质分析

根据前文研究,吴家湾金矿 S₂期烟灰色石英脉结构致密,与金矿化关系密切,认为是主成矿期热液产物。成矿流体属于中-低温、低盐度流体,在中-浅部成矿。流体包裹体的类型主要为富含 CO₂ 的 H₂O-CO₂体系包裹体,其液相成分以 H₂O 为主,含少量 CO₂ 和 CH₄;气相成分主要为 CO₂,其次为 CH₄、N₂及 H₂S。研究表明 CO₂ 可以调节流体 pH 值,扩大流体不混溶区域同时还能提升 Au 在流体中的含量及维持含 Au 络合物的稳定性,对 Au 的迁移及沉淀起到重要的作用(徐九华等,2007;卢焕章等,2008)。而 CH₄ 的存在同样可以扩大流体不混溶的范围,较 CO₂ 甚至影响更甚。当温度达 300℃

时,CO₂ 含量达 15 mol% 会有流体的不混溶现象发生,而 CH₄ 含量仅需大于 5 mol% 便会发生流体不混溶(NADON,1989),而吴家湾金矿床石英脉流体包裹体中富含 CO₂ 及 CH₄ 的特征则表明流体发生不混溶现象具有良好的先决条件。鉴于除 H₂O-CO₂型包裹体外同时发现有富 CO₂型包裹体的存在,推测这种富 CO₂型包裹体可能是由初始的 H₂O-CO₂型流体发生不混溶产生的,同时也暗示了成矿流体发生了相分离可能是 Au 沉淀的重要原因之一。

4.2 石泉-汉阴北部金矿区流体包裹体均一温度及盐度对比

通过研究吴家湾金矿流体包裹体的盐度及均一温度特征,整理出长沟、吴家湾、羊坪湾、鹿鸣及柳坑金矿的主成矿期的均一温度及盐度主要集中范围(表4)。

表4 汉阴北部不同金矿床所测流体包裹体均一温度及盐度表

Tab. 4 Homogeneous temperature and salinity of fluid inclusions measured in different gold

项目	黄龙金矿	长沟金矿	吴家湾金矿	羊坪湾金矿	鹿鸣金矿	柳坑金矿
均一温度集中范围(℃)	200~320	190~260	230~280	150~240	180~280	260~300
盐度集中范围(%)	0~19	6~12	2~10	2~15	5~15	7~12
均一温度峰值(℃)	270	220	250		246	270
数据来源	高雅宁(2017)	杨龙伟(2018)	本次研究	李福让(2009)	王新(2015)	高雅宁(2017)

以不同颜色的线段代表不同金矿,按其盐度及均一温度范围进行投图(图8)。所有金矿的均一温度跨度从 150~320℃,盐度跨度从 0%~19% 不等,不同金矿的均一温度及盐度范围差异较大。进而采

用矿床主成矿期流体包裹体的均一温度峰值及平均盐度来代表其均一温度及盐度,以不同矿床均一温度峰值及平均盐度的范围代表整个区域的最佳成矿温度及盐度区间。笔者将之前研究的从石家沟一胡

堂湾所有流体包裹体的数据分别按其平均盐度及均一温度峰值为横纵坐标投图(图8),发现所有的落点均一温度峰值及平均盐度落点相对集中,故而将

这个集中区域作为对成矿的有利均一温度及盐度区间,即均一温度为190~260℃,盐度为6%~10%,此温度和盐度可作为一个找矿的有利标志。

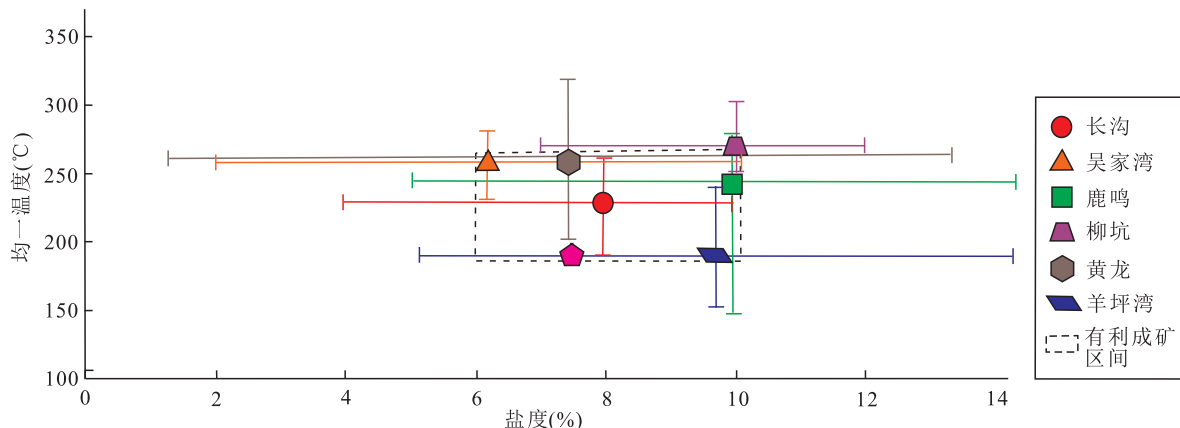


图8 汉阴北部不同地区包裹体均一温度峰值及平均盐度范围图

Fig. 8 Homogeneous temperature peak and average salinity range of inclusions in different areas of northern Hanyin

5 结论

(1)包裹体类型以 H_2O-CO_2 型包裹体为主,纯气相、纯液相及三相包裹体较少见;均一温度范围为176.8~344.4℃,集中于230~280℃。盐度范围为0.35%~13.51%,集中于2%~10%,成矿流体属于中-低温、低盐度流体;流体捕获深度为1.38~3.47 km,集中于1.5~2.8 km,于中浅部成矿;包裹体的液相成分近乎全部为 H_2O ,其次含少量 CO_2 和 CH_4 。气相成分整体上以 CO_2 为主,其次为 N_2 及 CH_4 ,同时还有少量 H_2S 的存在。

(2)吴家湾金矿经历了多期热液活动,其中 S_1 期石英脉矿区内出露较少,形成时代早,与金矿化无关。 S_2 期与 S_3 期石英脉与金矿化关系密切。其中 S_2 期石英脉金矿化现象明显,流体温度较低,认为是主成矿流体。

(3)经过对汉阴北部不同金矿主成矿期流体包裹体进行对比研究后发现,均一温度为190~260℃、盐度为6%~10%是有利于成矿的均一温度及盐度范围。区内研究过程中发现包裹体均一温度及盐度落在此区间范围内可作为找矿有利标志。

参考文献(References):

- 杜坚.安康北部志留系金矿地质特征及找矿前景探讨[J].矿物学报,2014,43(05):39-43.
- DU Jian. Geological characteristics and prospecting prospects of the Silurian gold deposits in northern Ankang[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 43(05): 39-43.
- 樊培贺.南秦岭汉阴县金斗坡-汉滨区柳树坪脆-韧性剪切带控矿构造特征与金矿成矿富集规律[D].西安:长安大学,2015.
- FAN Peihe. The ore-controlling structure of the Liushuping fragile-ductile shear zone in the Jindoupo-Habin area of Hanyin County, South Qinling and the metallogenic enrichment of gold deposits[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 韩珂,杨兴科,安乐,等.南秦岭汉阴黄龙金矿脆-韧性剪切带中 S_2 面理特征及其对成矿的作用[J].西北地质,2018,51(03):171-184.
- HAN Ke, YANG Xingke, AN Le, et al. S_2 Foliation Characteristics of Brittle-ductile Shear Zone in the Huanglong Gold deposit, Hanyin, South Qinling and Its Effect on Mineralization[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(03): 171-184.
- 高雅宁,杨兴科,杨龙伟,等.南秦岭汉阴北部金矿田控矿要素研究及找矿方向建议[J].地质力学学报,2016,22(02):245-255.
- GAO Yaning, YANG Xingke, YANG Longwei, et al. Study on ore-controlling factors and prospecting direction of

- gold deposits in the northern Hanyin area of the South Qinling Mountains[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(02):245-255.
- 高雅宁. 南秦岭汉阴北部金矿田陆内造山期构造—岩浆—成矿规律及成矿模式研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- GAOYaning. Study on the tectonic-magmatic-metallogenic regularity and metallogenic model of the intracontinental orogeny in the northern Hanyin gold field, South Qinling, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-487.
- LU Huanzhang, FAN Hongrui, NI Pei, et al. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-487.
- 卢焕章. CO₂流体与金矿化: 流体包裹体的证据[J]. *地球化学*, 2008, 04: 321-328.
- LU Huanzhang. CO₂ Fluid and Gold Mineralization: Evidence of Fluid Inclusions[J]. *Geochimica*, 2008, 04: 321-328.
- 李福让, 侯俊富, 杨弘, 等. 陕西石泉县羊坪湾金矿床地质—地球化学特征及金的富集规律[J]. *中国地质*, 2009, 36(01):174-183.
- LI Furang, HOU Junfu, YANG Hong, et al. Geological-geochemical characteristics and gold enrichment of the Yangpingwan gold deposit in Shiquan County, Shaanxi Province[J]. *Chinese Geology*, 2009, 36(01):174-183.
- 李桂敏. 地质流体与成矿作用[A]. 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 中国地质学会矿床地质专业委员会, 矿床地球化学国家重点实验室. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要文集[C]. 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 中国地质学会矿床地质专业委员会, 矿床地球化学国家重点实验室, 《矿物学报》编辑部, 2017: 1.
- 刘子燕. 地质流体与成矿作用[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1):606.
- LIU Ziyang. Geological fluids and mineralization[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(S1):606.
- 祁东. 汉阴北部吴家湾地区金矿床控矿因素与矿床成因研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- QI Dong. Study on ore-controlling factors and genesis of gold deposits in Wujiawan area, northern Hanyin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 邵洁涟, 梅建明. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J]. *矿物岩石*, 1986, (03):103-111.
- SHAO Jiewei, MEI Jianming. Study on the characterization of mineral inclusions in gold deposits in volcanic rocks of Zhejiang Province and their genesis and prospecting significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1986, (03):103-111.
- 王新, 杨宏宇, 杨兴科, 等. 南秦岭汉阴北部长沟—鹿鸣金矿流体包裹体研究[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1):623.
- WANG Xin, YANG Hongyu, YANG Xingke, et al. Study on Fluid Inclusions of Changgou-Luming Gold Deposit in Northern Hanyin, South Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(S1):623.
- 王新. 陕西省汉阴县长沟金矿流体包裹体特征及矿床成因研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- WANG Xin. Characteristics of fluid inclusions and genesis of Changgou gold deposit in Hanyin County, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- 徐九华, 谢玉玲, 丁汝福, 等. CO₂-CH₄流体与金成矿作用: 以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例[J]. *岩石学报*, 2007, (08):2026-2032.
- XU Jiuhua, XIE Yuling, DING Yufu, et al. CO₂-CH₄ Fluid and Gold Mineralization: A Case Study of the Southern Edge of the Altai Mountains and the Mulongtao Gold Deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, (08):2026-2032.
- 杨龙伟, 杨兴科, 韩珂, 等. 南秦岭汉阴北部长沟金矿床流体包裹体特征[J]. *西北地质*, 2018, 51(02):178-185.
- YANG Longwei, YANG Xingke, HAN Ke, et al. Fluid Inclusions of the Changgou Gold Deposit in North Hanyin, South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(02):178-185.
- 杨本昭, 吴邦朝, 王新社. 陕西省汉阴县铁佛—汉滨区流芳金矿地质特征及找矿标志[J]. *陕西地质*, 2010, 28(01):12-17.
- YANG Benzhaoh, WU Bangchao, WANG Xinshe. Geological Characteristics and Prospecting Indicators of the Liufang Gold Deposit in the Iron Buddha-Hanbin District, Hanyin County, Shaanxi Province [J]. *Geology of Shaanxi*, 2010, 28(01):12-17.
- 吴闻人, 王北颖, 等. 陕西省南秦岭造山带中部韧性剪切带的形成、演化及其与金矿成矿关系研究[R]. 西安: 陕西省地矿局, 1991.
- 张康. 南秦岭汉阴北部志留系金矿田构造控矿规律及找矿标志研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- ZHANG Kang. Study on the ore-controlling laws and prospecting indicators of the Silurian gold ore field in the northern Hanyin, South Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- NADON J. Role of methane and ear bondi oxideing oldde Position[J]. *Nature*, 1989, 342:793-795.