

鄂西北构家河金矿床成矿流体特征

王 刚, 武昱东, 贾少华, 张 晗, 陈 雷, 王宗起

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 构家河金矿床位于南秦岭武当山西缘, 产于绢云绿泥石英片岩和变石英砂岩之中, 受韧性滑脱剪切构造带控制。矿化类型主要有破碎带蚀变岩型和石英脉型, 其中前者形成了破碎带蚀变岩型主矿体, 呈层状或透镜状分布于近南北向断裂中, 次矿体分布在北西和北东向次级断裂中, 为石英脉型矿体。成矿作用包括3个阶段: 石英-硫化物阶段、石英-硫化物-金银矿化阶段和石英-碳酸盐阶段。对主矿体石英-硫化物-金银矿化阶段和石英-碳酸盐阶段的流体包裹体进行了显微观察和测温, 同时对不同阶段的石英和方解石、白云石等进行了D、O、C同位素测试。结果显示, 包裹体以原生气液两相包裹体为主, 且主要为富液相包裹体; 石英-硫化物-金银矿化阶段包裹体均一温度集中于180~270℃, 峰值为220℃, 盐度和密度分别为1.40%~14.46%和0.60~0.97 g/cm³; 石英-碳酸盐阶段均一温度峰值为170℃, 盐度和密度分别为1.34%~7.31%和0.86~0.96 g/cm³; 石英-硫化物-金银矿化阶段和石英-碳酸盐阶段石英的 δD_{V-SMOW} 值分别为-93.3‰~-70.9‰和-91.6‰~-67.2‰, $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为12.9‰~14.5‰和11.9‰~13.8‰; 方解石和白云石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值为-12.4‰~-12.0‰, $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 值为-18.4‰~-18.1‰。成矿流体特征显示该矿床初始成矿流体为中温、低盐度的变质热液, 再结合区域成矿地质与成矿构造背景, 认为构家河金矿为造山型金矿床。

关键词: 流体包裹体; C-H-O同位素; 矿床成因; 构家河金矿床

中图分类号: P618.51; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0668-13

Geochemical characteristics of ore-forming fluid in the Goujiahe gold deposit, northwest Hubei Province

WANG Gang, WU Yu-dong, JIA Shao-hua, ZHANG Han, CHEN Lei and WANG Zong-qi

(MLR Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The Goujiahe gold deposit is located in the western Wudang Mountain of South Qinling, which is controlled by ductile slip-shear belt and occurs in sericite chlorite-quartz schist and metamorphic quartz sandstone. The mineralization type is mainly composed of fracture alteration type and quartz vein type mineralization, in which the former formed the main orebody. The main fracture alteration type orebody is distributed in nearly NS-trending fault in stratoid or lenticular form, and the secondary orebodies were filled in NW- and NE-trending secondary faults, forming quartz vein ore bodies. Three metallogenic phases were recognized: the early quartz-sulfide stage, the middle quartz-sulfide-gold and silver stage and the late quartz-carbonate stage. The fluid inclusions of the quartz-sulfide-gold and the silver stage and the quartz-carbonate stage of the main orebody were observed and measured, the D, O, C isotope analysis of different stages of quartz and calcite and dolomite was conducted. The results show that most of fluid inclusions are enriched in liquid primary inclusions in crowded random distribution. The homogeneous temperature peak is mostly 220℃ and 170℃, the salinity is 1.40% to 14.46%

收稿日期: 2016-11-21; 接受日期: 2017-07-24

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项经费(K1615, YK1701); 中国地质调查局地质调查项目(12120113069000)

作者简介: 王 刚(1984-), 男, 汉族, 博士, 主要从事火山岩与成矿学研究, E-mail: wanggang0315@126.com; 通讯作者: 王宗起(1960-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事大地构造与成矿作用研究, E-mail: kcwzq@vip.sina.com。

and 1.34% to 7.31%, the density is 0.60~0.97 g/cm³ and 0.86~0.96 g/cm³ for the quartz-sulfide-gold and silver stage and the quartz-carbonate stage respectively. The hydrogen and oxygen isotope study of the two phase yielded 12.9‰~14.5‰ and 11.9‰~13.8‰, and the carbon and oxygen isotope study of calcite and dolomite yielded the values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -12.4\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = -18.4\text{‰} \sim -18.1\text{‰}$, suggesting that the original ore-forming fluids were metamorphic in genesis, characterized by mesothermal and low-salinity nature. Geological and fluid features and metallogenic tectonic background suggest that the Goujiahe gold deposit may be of the orogenic-type mineralization system.

Key words: fluid inclusion; C-H-O isotope; ore genesis; Goujiahe gold deposit

Fund support: CAGS Research Fund (K1615, YK1701); Fundamental Research Funds for the Geological Survey Project of China (12120113069000)

鄂西北构家河金矿床为武当-桐柏-大别成矿带内郧西-丹江口金-多金属成矿远景区中具有代表性的矿床之一(图 1a、1b),区域上发育白岩沟中型石英脉型金矿床、余家院中型蚀变岩型银金矿床、锡洞沟小型构造充填型铅锌矿床等。构家河金矿床于 20 世纪 90 年代被发现并相继开展矿床勘查工作,查明该矿区金矿储量达中型规模(鄂西北地质矿产调查所,2010)^①。早期,田云华(1997)就该矿床的地球化学特征及矿床成因问题开展过研究工作,初步阐述了该矿床形成机理和成矿物质来源,确定其为与韧性剪切变形变质作用有关的中低温热液矿床,然而该矿床的基础地质和成因研究都非常薄弱。本文通过对构家河金矿成矿期样品流体包裹体岩相学、显微测温及 C、H、O 同位素研究,分析该矿床的成矿流体来源,欲为矿床成因研究提供理论依据。

1 区域与矿床地质特征

1.1 区域地质背景

构家河金矿床行政区划属湖北省郧西县,大地构造上属于南秦岭武当山西北缘,区域上出露地层为新元古代武当群、耀岭河群,震旦系陡山沱组、灯影组。其中,武当群包含变沉积岩岩组和变火山岩岩组,其上为耀岭河群中基性火山-沉积岩(凌文黎等,2002; 蔡志勇等,2007; Ling *et al.*, 2008; 王宗起等,2009; Zhu *et al.*, 2014),震旦系两组岩性主要为灰岩、白云质灰岩、含钙绢云母片岩、千枚岩等(岳素伟等,2013)。此外,部分区域出露中、新生代地层,区域内普遍发育镁铁质岩脉,时代横跨新元古

代-中生代(王宗起等,2016)^②。区域地层均遭受不同程度的区域变质和动力变质作用,变质程度达绿片岩相。

研究区经历了新元古代至中生代俯冲-增生-碰撞造山的多期多阶段变形作用,不仅形成了两郧断裂、十堰断裂和房县-青峰断裂等,也使得各地层内部及之间发育顺层剪切断层(王宗起等,2009)。另外,区域内武当群变酸性火山岩中发育竹山银洞沟石英脉-蚀变岩型大型银金多金属矿床,耀岭河群变基性火山岩中发育白岩沟石英脉型中型金矿床,陡山沱组变碎屑岩夹基性火山岩中发育余家院蚀变岩型中型银金矿床等,上述金属矿床都处在构造叠加部位。因此,区域多金属矿受地层和构造双重控制,区域上多期次的构造变形与叠加改造为热液矿床创造了良好的动力学和热力学条件,具有寻找大中型贵金属矿床的地质背景。

1.2 矿区地质

构家河金矿床矿区地质相对简单,主要岩石地层为绿片岩相变质岩与浅变质海相碎屑沉积岩和碳酸盐岩,分别为前人厘定为下震旦统耀岭河群和上震旦统陡山沱组。前者主要由变细碧岩、绢云绿泥石英片岩及绿泥绢云钠长石英片岩等组成,基于岩石和矿石硫铅同位素研究有学者提出该套物质为矿源建造(田云华,1997; 贾少华,2015);后者主要为变石英砂岩、变长石石英砂岩、绢云绿泥石英片岩及含炭质灰岩、灰岩等组成,为赋矿地层(图 1c,田云华,1997)。

矿区地处两郧复式背斜北西倾伏端,距两郧大断裂约 4 km,区内褶皱/断裂十分发育,后期脆性断

① 鄂西北地质矿产调查所. 2010. 湖北郧西构家河金矿区详查设计.

② 王宗起, 武昱东, 王刚, 等. 2016. 武当-桐柏-大别关键地区区域地质调查成果报告.

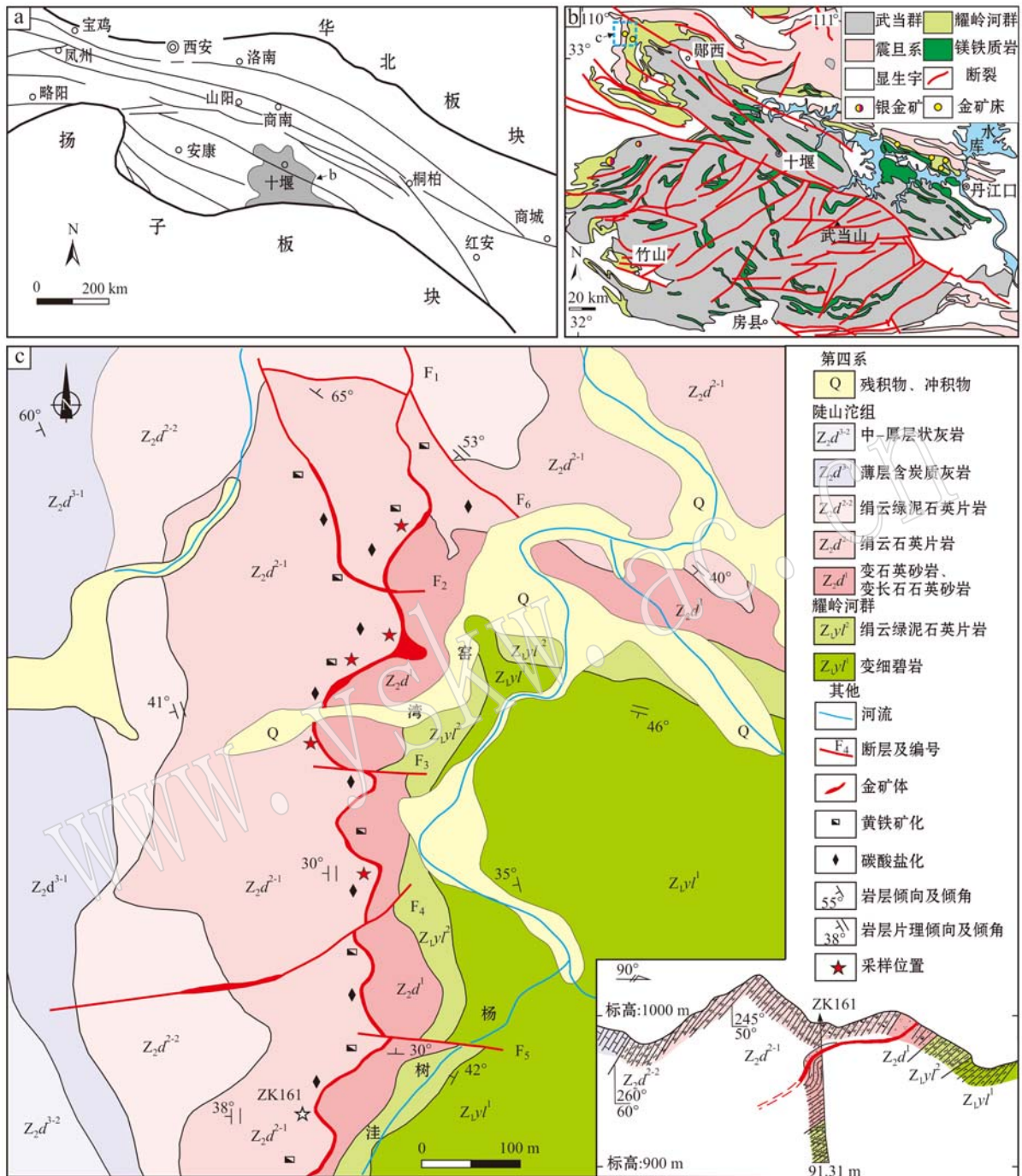


图 1 构家河金矿床区域地质及矿区地质简图

Fig. 1 Regional and mining area sketch map for the Goujiahe gold deposit

a 据王宗起等(2009)修改; b 据秦正永等(2005)修改; c 据鄂西北地质矿产调查所(2010)^①修改

a modified after Wang Zongqi *et al.*, 2009; b modified after Qin Zhengyong *et al.*, 2005; c after Geology and Mineral Resources Survey of Northwest Hubei Province, 2010^①

裂叠加在早期韧性断裂上,岩石普遍破碎强烈,具糜棱岩化特征。地层总体外观呈单斜产出,构造线展布总体近南北向。耀岭河群与陡山沱组之间发育的

区域性大型韧性滑脱剪切构造带贯穿整个矿区。前人研究认为区域上发育的韧性滑脱剪切带其滑脱事件时代为 230~210 Ma,且滑脱构造具有多层次的特

① 鄂西北地质矿产调查所. 2010. 湖北郧西构家河金矿区详查设计.

点(许志琴等, 1997), 或伸展滑脱为海西-印支期(280~200 Ma)的连续递进变形过程, 而走滑剪切构造稍晚(胡健民等, 1999, 2000)。因此, 田云华等(1997), 认为矿区滑脱构造形成于海西-印支期早期, 随后沿滑脱构造带叠加的韧-脆性剪切作用表现以脆性变形为主, 为金矿化成矿作用提供有利的扩容构造。后期叠加的脆性断裂以近南北向为主, 次为北东向和北西向, 是矿区的主要控矿容矿构造, 各矿体均严格地受其控制。

1.3 矿体特征

矿体主要分布于滑脱剪切构造带叠加的脆性断层中, 主矿体分布于北北西-北东向 F_1 断层破碎蚀变带中, 其次分布于次一级北西向 F_2 和北东向 F_4 断层及张性裂隙中(图 1c)。按其成矿地质特征、控矿因素等, 可划分两种矿化类型: 一是破碎带蚀变岩型金矿, 为本矿床的主矿体; 二是石英脉型金矿, 以石英单脉型为主。主矿体为破碎带蚀变岩型, 产于南北向脆性断裂破碎蚀变带内, 受主断裂 F_1 控制, 局部地段被次级东西向小断裂错开, 但断距较小, 影

响不大, 矿体产状与断裂带产状基本一致。矿体主要由断层破碎带中的蚀变绢云石英片岩及夹杂其间的顺片理石英细脉及团块、顺断层分布的石英脉和断裂破碎带底板的蚀变石英砂岩组成(图 1c、图 2a), 且矿体与破碎蚀变岩没有明显分界。主矿体呈似层状产出, 局部膨大, 呈囊状, 矿体长 1 150 m, 厚 1~3 m, 产状受断裂破碎带控制, 走向 $350^\circ \sim 40^\circ$, 倾角 $\angle 45^\circ \sim 70^\circ$, 局部产状近于直立, 受次级褶皱及断裂影响变化较大。次矿体属于石英脉型矿体, 分布于主矿体上盘或滑脱带附近, 分别受北西向(F_2)和北东向(F_4)两组侧羽裂隙影响, 产状与断裂产状一致, 矿体主要由含金石英脉及其两侧的蚀变围岩组成, 含矿围岩以变石英砂岩、变长石石英砂岩和绢云石英片岩为主。金以自然金为主, 可以富集于石英脉内或其两侧, 也可以相对富集于脉的上下盘线型蚀变围岩中。其中北西向矿体呈脉状产出, 长约 224 m, 走向 310° , 倾角 $\angle 50^\circ \sim 73^\circ$; 北东向含金石英脉与地层呈大角度相交, 矿体长约 170 m, 矿体呈脉状产出, 走向 45° , 倾角 $\angle 65^\circ \sim 75^\circ$, 矿体局部被后期近南

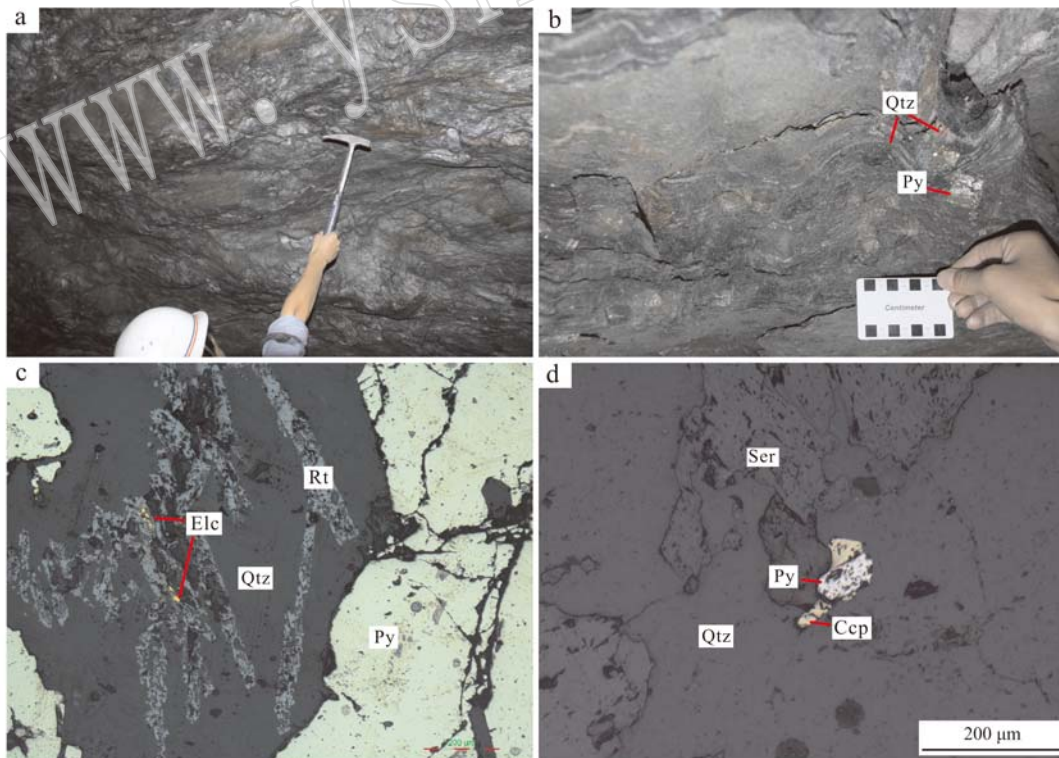


图 2 构家河金矿床矿体(a)、矿石(b)和矿物(c、d, 反射光下)特征

Fig. 2 Characteristics of orebody (a), ore (b) and minerals (c, d, reflected light) for the Goujiahe gold deposit

Qtz—石英; Ser—绢云母; Py—黄铁矿; Elc—银金矿; Rt—金红石; Ccp—黄铜矿
 Qtz—quartz; Ser—sericite; Py—pyrite; Elc—electrum; Rt—rutile; Ccp—chalcopyrite

北向的小断裂错断,但断距较小,最大也只有几米,影响不大。

矿石矿物组成比较简单,金矿物主要为金银系列矿物,主要成分为金,其次含银,金银比例 3.3:1~5.3:1,伴生金属矿物有金红石、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿等;脉石矿物有绢云母、石英、白云母、绿泥石,次含少量方解石、电气石、磷灰石等;次生矿物为孔雀石、褐铁矿等。其中金以显微金和自然金形式出现,一般粒度为 0.1~0.2 mm,嵌布在脉石矿物的石英、云母和金红石裂隙中;银主要以银金矿、铜矿物的类质同像形式存在,常见辉铜银矿、辉银矿。

围岩蚀变类型主要有硅化、黄铁矿化、镜铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等,具有多种蚀变组合类型,并具退色现象。其中硅化表现为各成矿期和成矿阶段出现的石英脉;黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化普遍发育,分布于赋矿围岩中,发生在成矿早期和主成矿期;碳酸盐化主要发生在主成矿晚期石英脉中。围岩蚀变严格受断裂构造带控制,近矿围岩普遍发生热液蚀变,强蚀变带宽度一般 1~1.5 m,局部大于 5~10 m。蚀变一般都不是孤立出现的,或是伴随石英脉体存在,形成石英脉-蚀变岩型金矿体;或是伴随断裂、断裂破碎带出现,形成破碎带蚀变岩型金矿体。总之,蚀变与矿化在空间上、成因上都有密切的联系。

根据各矿石类型及脉体在空间的展布特点及矿石富集规律,大致可划分出 3 个成矿阶段。早期石英-硫化物阶段,为区域变质和动力变形变质作用下成矿热液富集导致金的初步矿化,形成大量巨型黄铁矿(图 2b),该期发生硅化、黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化;主成矿期为石英-硫化物-金银矿化阶段,是主要构造叠加富集矿化期,先后形成石英、细粒黄铁矿、黄铜矿、银金矿、辉银矿、辉铜银矿等(图 2c、2d),主要发生硅化、黄铁矿化、绢云母化、镜铁矿化等,具有多种蚀变组合类型和退色现象;晚期主要是石英-碳酸盐阶段,形成石英、方解石及白云石等少见金属矿物,主要发生硅化和碳酸盐化。矿体还具有表生风化特征,形成孔雀石和褐铁矿等次生矿物。

2 样品采集与测试

采集构家河金矿床主矿体中石英-硫化物-金银矿化阶段和石英-碳酸盐阶段不同部位样品,进行包

裹体片磨制及单矿物挑选。采样位置见图 1。挑选出 7 件样品进行流体包裹体显微观察和测温,同时选取了不同成矿阶段的石英、方解石和白云石进行碳、氢、氧同位素测试。本次实验测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

包裹体的显微测温时在英国 Linkam THMS-600 冷热两用台上进行的,可测温度范围为 -180~550℃,可控冷冻、加热速率为 0.1~130℃/min,冷冻数据和加热数据精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。测试时,一般冷却降温及升温速率为 30℃/min,在 -65~-55℃ 以及 0~30℃ 之间,升温速率为 1℃/min,200℃ 以上升温速率为 10℃/min,在相变点附近升温速率小于 0.1℃/min。

称取石英(40~60)目样品 5~10 mg,在 105℃ 恒温烘箱中烘烤 4 h 以上,用干燥洁净锡杯包好备用。先用高纯氦气冲洗置换元素分析仪里的空气,使氢气本底降低。温度升高到 1400℃,本底降到 50 mV 以下可进行样品测试。在装有玻璃碳的陶瓷管中,样品爆裂释放出 H_2O 、 H_2 等含氢气体, H_2O 及其它可能存在的有机物在高温下与玻璃碳发生还原反应,生成氢气,高纯氦气流将氢气带入 MAT253 气体同位素质谱仪进行分析。测量结果记为 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$,分析精度优于 $\pm 1\%$ 。样品在制样装置达到 10^{-3} Pa 真空条件下,与纯净的 BrF_5 在 500~680℃ 恒温条件下反应 14 h,释放出 O_2 和杂质组分,将杂质组分用冷冻法分离出去,纯净氧气在 700℃ 并有铂催化剂条件下,与石墨恒温反应生成 CO_2 ,用冷冻法收集 CO_2 并用 MAT253 气体同位素质谱分析,测量结果记为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$,分析精度优于 $\pm 0.2\%$ 。

将碳酸盐矿物样品研磨至 180 目,烘箱 105℃ 温度烘烤样品 2 h,去除吸附水。在 75℃ 下烘烤制样设备的样品管,烘干后将约含有 0.2 mg 的样品放入样品管中并封盖。用高纯氦气将样品管中的空气排出。用酸泵向样品管中加过量的 100% 磷酸。在 25℃ 时磷酸与方解石反应产生 CO_2 ,用高纯氦气将生成的 CO_2 带入 MAT253 质谱仪测试。在 75℃ 时磷酸与白云石反应产生 CO_2 ,用 MAT253 气体同位素质谱仪测量。每 5 个样品加入 1 个标准,用参考气对其比对测试,测量结果分别记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$,精度优于 $\pm 0.1\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体岩相学

镜下观察发现,构家河金矿床样品流体包裹体较为发育,主要赋存于石英矿物中,且组合较为简单,主要为呈无色-灰色的富液包裹体(图 3a、3b),部分视域内发育呈透明无色的纯液体包裹体(图 3c)及呈灰-深灰色的气体包裹体(图 3d)。包裹体多随机成群分布(图 3a),形态规则,以椭圆形、浑圆形、近四边形、石英负晶形、长条形为主,大小在 4~34 μm 之间,平均 11 μm ,显示出原生流体包裹体特征,部分为沿裂隙呈线状分布的后期原生包裹体或次生包裹体(图 3b)。由于石英-硫化物-金银矿化阶段形成稍早,该阶段样品发育原生包裹体的同时可能会受石英-碳酸盐阶段影响而发育后期流体包裹体。本次研究对象主要为富液体原生包裹体,经镜下系统特征分析表明,富液包裹体中气液比均一,在 10%~30% 之间(表 1)。

3.2 流体包裹体显微测温

利用 Linkam THMS-600 冷热两用台对构家河金矿床中石英-硫化物-金银矿化阶段 5 件样品和石英-碳酸盐阶段 2 件样品分别进行了 115 和 47 个流体包裹体(均为赋存于石英矿物中的富液包裹体)显微测温,测试结果见表 1 和图 4,盐度和密度数据经过不同公式和程序计算完成(Hall *et al.*, 1988; Brown *et al.*, 1995; 刘斌, 1999)。测温结果显示包裹体基本都完全均一至液相,石英-硫化物-金银矿化阶段包裹体均一温度介于 165~358 $^{\circ}\text{C}$ 之间,主要集中在 180~270 $^{\circ}\text{C}$ 之间,峰值为 220 $^{\circ}\text{C}$;石英-碳酸盐阶段包裹体均一温度介于 114~211 $^{\circ}\text{C}$ 之间,主要集中在 160~180 $^{\circ}\text{C}$,峰值为 170 $^{\circ}\text{C}$,仅有极少数包裹体均一温度高于 190 $^{\circ}\text{C}$ (图 4a),其中较少数低于 160 $^{\circ}\text{C}$ 温度可能为沿裂隙分布的后期或次生包裹体温度。田云华(1997)所测 185~265 $^{\circ}\text{C}$ 和 105~165 $^{\circ}\text{C}$ 的温度区间可能分别代表了本文测试不同成矿阶段。

石英-硫化物-金银矿化阶段流体包裹体盐度

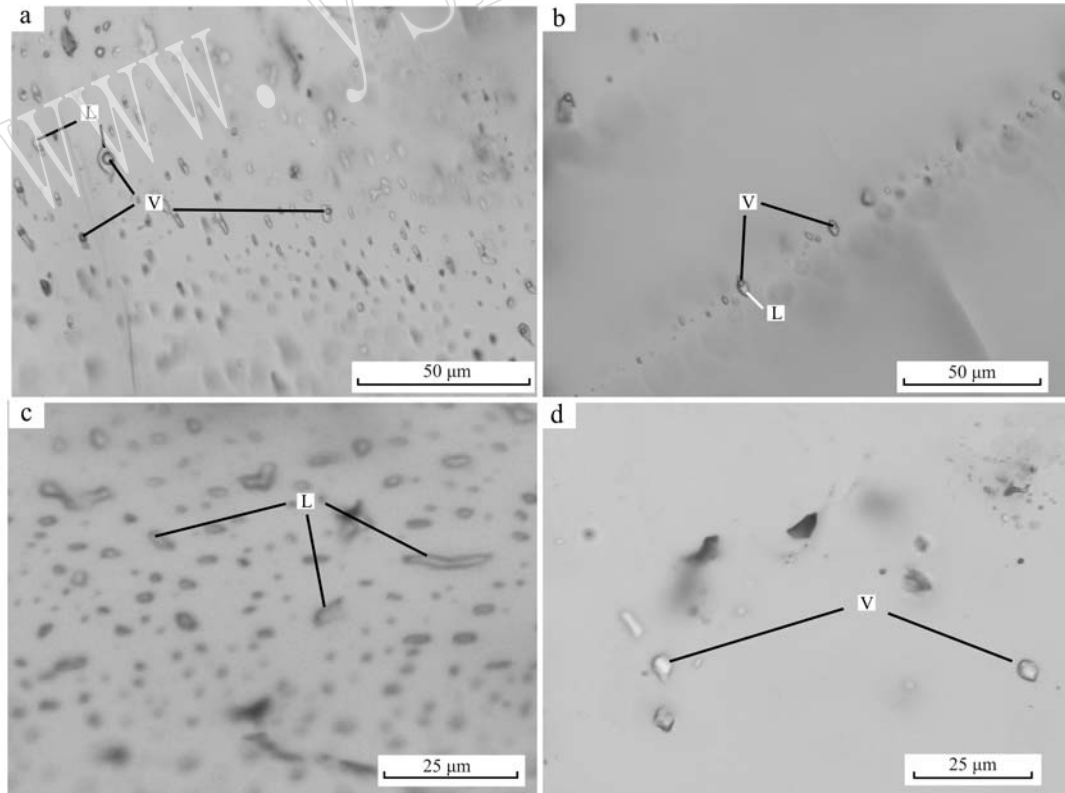


图 3 构家河金矿床流体包裹体显微特征照片

Fig. 3 Photographs of fluid inclusions for the Goujiahe gold deposit

表1 构家河金矿床流体包裹体测温结果
Table 1 Microthermometric results of fluid inclusions for the Goujiahe gold deposit

样号	采样位置	矿化阶段	气液比例/%	均一温度/°C	盐度/%	备注
YXL-1	破碎带中含石英细脉矿体 (F ₁)	石英-硫化物- 金银矿化阶段	10~20	173~316	1.74~4.65	本文测试
YXL-7	破碎带中含巨粒黄铁矿石英脉矿体 (F ₁)		15~20	178~358	1.57~4.49	
YXL-15	破碎带中含石英细脉矿体 (F ₁)		10~20	198~306	1.40~4.03	
YXL-23	破碎带中含石英细脉矿体 (F ₁)		10~30	175~229	2.24~4.80	
YXL-13	破碎带中含石英细脉矿体 (F ₁)		10~30	165~292	2.24~14.46	
YXL-4	破碎带中石英细脉 (F ₁)	石英-碳酸盐 阶段	10~30	114~211	1.34~7.31	本文测试
YXL-10	不规则石英脉 (F ₁)		20~30	152~207	2.74~4.49	
6W-1	含金石英脉 (F ₂)		8~10	105~165 205~215	6~6.7 7.7~9.1	
Gs93-8	含金石英脉 (F ₄)		10~15	105~165	7.0~7.6	田云华 (1997)
Gs93-11	破碎带中粗大石英脉 (F ₁)		10~30	215~265	7.6	
S-3	绢云石英片岩中斜切片理之含金石英脉 (F ₁)		10~15	115~125 135~165	5.1~5.4 6.5~7.2	
Sy-10	破碎带顺劈理石英团块 (F ₁)		15~20	115~125 145~165 185~215	6.3~6.5 6.7~7.2 7.9~8.2	田云华 (1997)

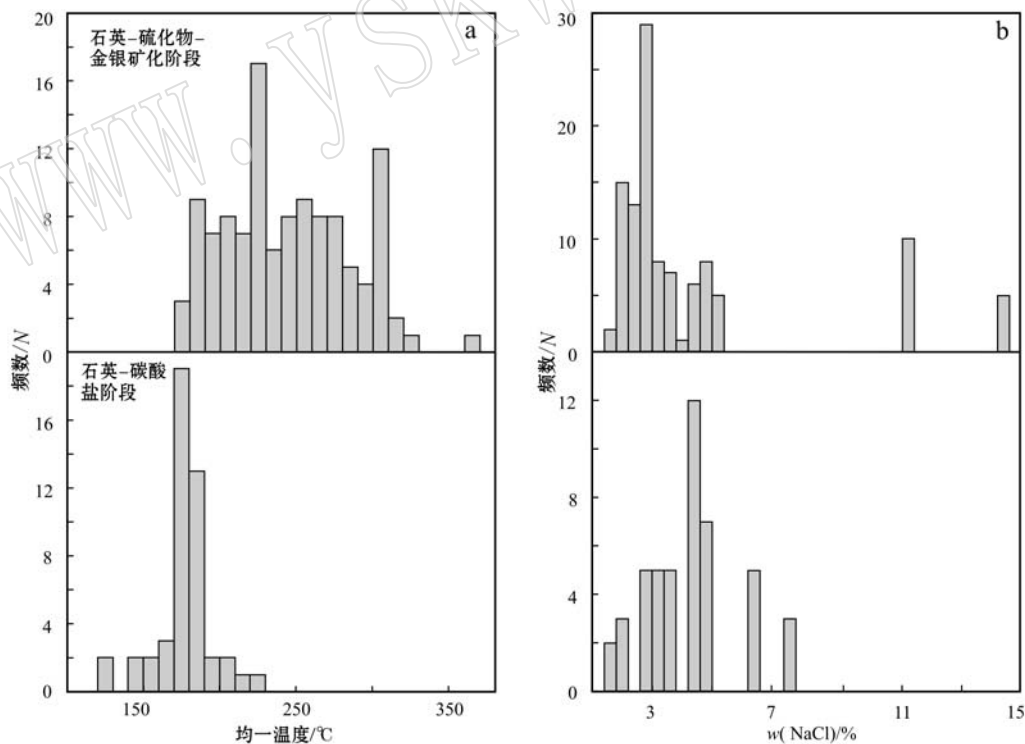


图4 构家河金矿床含石英脉流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 4 Histograms of homogeneous temperature and salinity of fluid inclusions for the Goujiahe gold deposit

[$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$, 下同]介于1.40%~14.46%的范围内,主要集中在1.4%~3.8%之间,峰值为2.8%~3.0%,属于低盐度流体,部分为中盐度流体;石英

-碳酸盐阶段流体包裹体盐度介于1.34%~7.31%的范围内,主要集中2.6%~5.0%,属于低盐度流体(图4b)。通过流体包裹体均一温度和盐度的关系

图(图5)可以看出石英-硫化物-金银矿化阶段部分流体包裹体表现盐度和温度具有弱相关性特征,石英-碳酸盐阶段流体包裹体的盐度和温度也表现出弱相关性特征。利用盐度-温度-密度图解估算出主成矿期两个阶段的成矿流体密度范围分别约为 $0.60 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$ 和 $0.86 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$, 均属于低密度流体。

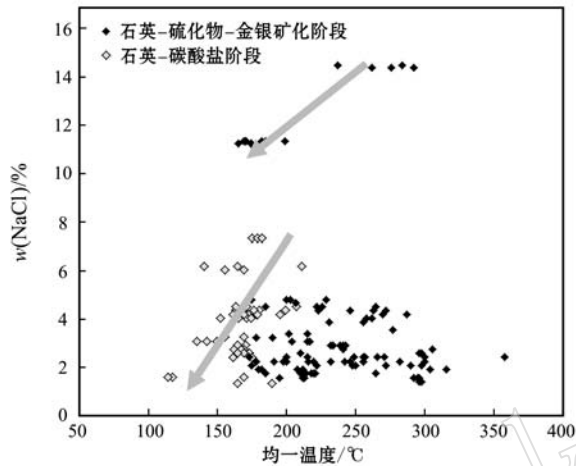


图5 构家河金矿床含石英脉流体包裹体均一温度与盐度关系图

Fig. 5 The relationship between homogeneous temperature and salinity of fluid inclusions for the Goujiahe gold deposit

4 C-H-O 同位素组成

不同来源流体的同位素组成有明显的差异(White, 1974)。为对构家河金矿床成矿流体来源问题进行探讨,本次在上述进行包裹体测试分析样品及主矿体不同层位矿石样品中挑选了3件白云石和1件方解石进行了C-O同位素测试分析,并挑选了14件石英进行了H-O同位素测试分析。其中C-O同位素测试中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03086 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.86$ (Friedman and O'Neil, 1977), H-O同位素测试中石英单矿物平衡流体中水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 根据公式 $1000 \ln \alpha = 3.38 \times 10^6 / t^2 - 3.4$ (Clayton *et al.*, 1972) 计算,结果见表2。

从测试数据表中可见,两阶段石英矿物 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 同位素值变化较大,分别为 $-93.3\% \sim -70.9\%$ 和 $-91.6\% \sim -67.2\%$, 石英矿物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 分别为 $12.9\% \sim 14.5\%$ 和 $11.9\% \sim$

13.8% 。根据石英与水之间的氧同位素分馏方程计算两阶段成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 2.4\% \sim 4.7\%$ 和 $-1.9\% \sim 0.0\%$ 。矿石内方解石与白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-12.4\% \sim -12.0\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-18.4\% \sim -18.1\%$, 结果比较集中、均一。

5 矿床成因探讨

5.1 成矿流体性质及来源

流体是热能的载体,也是不同存在形式矿质的载体(Wilkinson, 2001),热液脉型矿床的成矿过程实质上就是流体作用的过程,而包裹体的类型、均一温度等能够反映成矿流体的演化。构家河蚀变岩型金矿体主成矿期流体包裹体组合简单,主要为富液两相包裹体,包裹体均一温度介于 $165 \sim 358^\circ\text{C}$ 之间,其中 $160 \sim 180^\circ\text{C}$ 的均一温度与石英-碳酸盐阶段温度吻合,可能所测试对象为后期包裹体。野外和镜下特征显示早期石英-硫化物阶段被主成矿期改造叠加,依据矿物生成先后顺序,较高温度可能对应成矿初期的流体包裹体,因此认为 $180 \sim 270^\circ\text{C}$ (峰值为 220°C) 的均一温度可能与金成矿关系最为密切,对应的盐度介于 $1.40\% \sim 14.46\%$ 之间,主要集中在 $1.40\% \sim 3.8\%$, 峰值 $2.6\% \sim 3.0\%$, 流体密度范围约为 $0.60 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$ 。由此可见,该矿床流体具有中温、低盐度、低密度特点。

氢和氧同位素常被用来示踪热液矿床的成矿流体来源(Pirajno, 2009)。在 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 同位素图(图6)上,主成矿期样品点多数落在岩浆水和变质水附近,与我国小秦岭和胶东金矿集区具有相似特征,而石英-碳酸盐阶段样品表现出向雨水线演化的趋势,与银洞沟银金矿不同成矿阶段特征较为相似。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值与低级变质作用的千枚岩或片岩的 $\delta^{18}\text{O}$ ($11\% \sim 13\%$) 和浅变质岩中石英的 $\delta^{18}\text{O}$ ($13\% \sim 15\%$) 值较一致(郑永飞等, 2000), 部分样品值偏高可能是围岩地层主要由高 $\delta^{18}\text{O}$ 石英砂岩等组成有关(夏锐等, 2013)。田云华(1997)通过对矿床硫化物 S、Pb 同位素研究,提出成矿物质来源于矿区发育的基性火山岩。本矿区及周围未见印支期岩浆活动,且矿区流体具有盐度低等特征,这些均表明该矿区成矿流体不是岩浆水,矿床成矿物质和流体来源均与区域上发生绿片岩相变质作用的围岩有关。

表 2 构家河金矿床单矿物 C-H-O 同位素分析结果

‰

Table 2 Analytical results of carbon, hydrogen and oxygen isotopes of different minerals in the Goujiahe gold deposit

样号	矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$t/^\circ\text{C}^*$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	备注
YXL-1	石英	-	-	-	220 (180~230)	-79.2	12.9	2.4(-0.2~2.9)	
YXL-7	石英	-	-	-	220 (190~280)	-80.6	13.2	2.7(0.8~5.6)	
YXL-11	石英	-	-	-	220	-87.1	14.5	4.0	
	石英	-	-	-	220	-86.9	14.0	3.5	
YXL-13	石英	-	-	-	240 (170~290)	-82.8	14.1	4.7(0.3~6.8)	本文测试
YXL-15	石英	-	-	-	220 (220~270)	-87.6	13.7	3.2(3.2~5.6)	
YXL-20	石英	-	-	-	220	-90.7	14.0	3.5	
YXL-23	石英	-	-	-	210 (200~230)	-70.9	13.9	2.8(2.2~3.9)	
YXL-34	石英	-	-	-	220	-93.3	12.9	2.4	
YXL-4	石英	-	-	-	170 (160~180)	-70.1	11.9	-1.9(-2.7~-1.2)	
YXL-10	石英	-	-	-	170 (140~190)	-68.6	12.3	-1.5(-4.1~-0.1)	
	白云石	-12.1	-18.3	12.0	-	-	-	-	本文测试
	白云石	-12.0	-18.4	11.9	-	-	-	-	
YXL-17	石英	-	-	-	170	-67.2	13.8	0.0	
	石英	-	-	-	170	-81.8	13.1	-0.7	
	白云石	-12.4	-18.1	12.2	-	-	-	-	
YXL-32	石英	-	-	-	170	-91.6	12.1	-1.7	
	方解石	-12.3	-18.2	12.1	-	-	-	-	
6w-1	石英	-	-	-	210 (205~215)	-66.1	16.2	5.1(4.8~5.4)	
S-3	石英	-	-	-	150 (135~165)	-55.7	13.3	-2.1(-3.6~-0.9)	田云华 (1997)
G ₅ 93-11	石英	-	-	-	240 (215~265)	-76.2	13.5	4.1(2.7~5.2)	

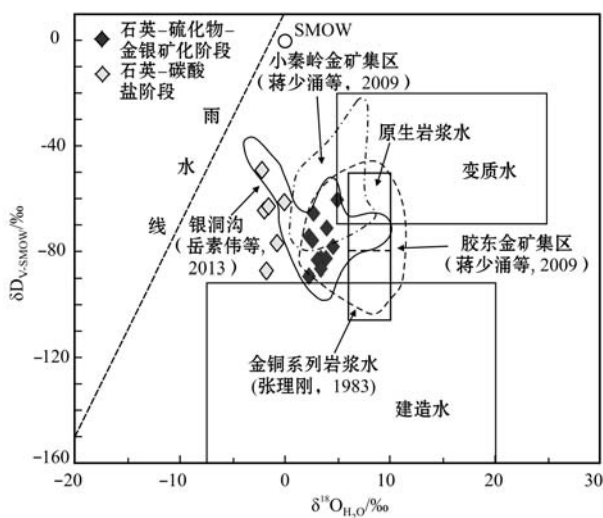
注：-代表未测试；* $t/^\circ\text{C}$ 表示流体包裹体均一温度峰值（均一温度集中值范围）。

图 6 构家河金矿石英氢氧同位素组成

Fig. 6 The composition of hydrogen-oxygen isotope for quartz in the Goujiahe gold deposit

石英-碳酸盐阶段方解石和白云石碳、氧同位素特征显示, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 $-12.4\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 为 $-18.4\text{‰} \sim -18.1\text{‰}$ 。在自然界中碳的来源具有多样性, 本文测试数据碳接近大气 CO_2 值 (Schidlowski, 1998), 分布在淡水 CO_2 、淡水碳酸盐和岩浆系统 (Hoefs, 2004) 碳源区范围内。研究表明, 碳源区不同则碳、氧同位素具有不同分馏趋势, 在图 7 中, 样品主要投影在岩浆岩流体碳源附近和火成岩外变质带下方。考虑到正常岩浆流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值在 -7‰ 左右, 认为该矿区碳可能来源于火山岩变质脱水形成的热液与大气 CO_2 的混合物。

综上所述, 构家河金矿床初始成矿流体为中温、低盐度、低密度流体, 主要来源于岩石建造的变质流体, 向大气降水演化。

5.2 成矿构造背景与机制

南秦岭造山带于印支期发生板块洋陆俯冲和陆陆碰撞造山作用, 最近研究表明, 郧西-丹江口地区

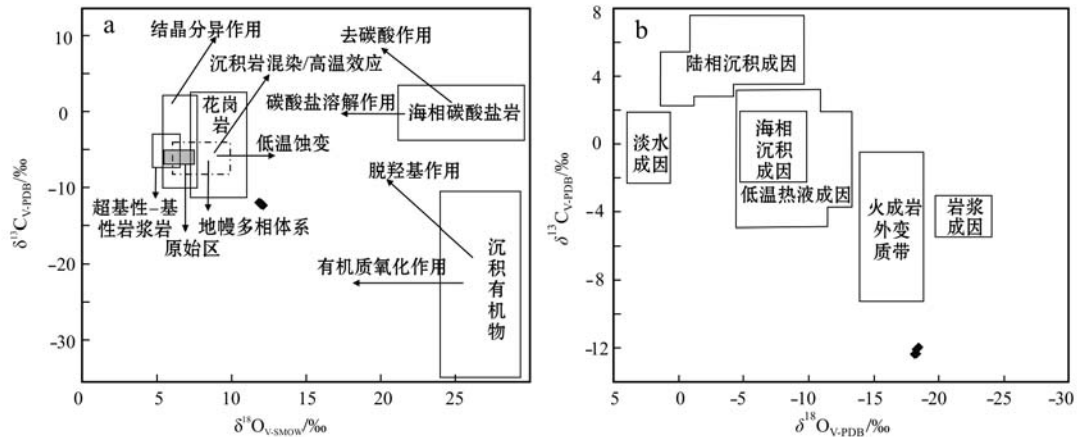


图 7 构家河金矿床方解石和白云石碳氧同位素组成图解[a 据张瑞斌等(2003)修改, b 据徐田武等(2009)]
 Fig. 7 The composition of carbon-oxygen isotope for calcite and dolomite in the Goujiahe gold deposit (a modified after Zhang Ruibin *et al.*, 2003; b after Xu Tianwu *et al.*, 2009)

具有混杂岩带性质,结合区域上岩石组成特征,南秦岭显生宙并非完全由有序沉积地层组成,而是由多条混杂岩带与弧前沉积共同组成,经历了长期的北向俯冲和多期的增生造山(王宗起等,2016)^①。上述增生与碰撞造山作用致使区域上遭受强大的南北向挤压应力作用,发育叠瓦状断裂和紧闭斜歪褶皱组成的逆冲推覆构造、北西西向韧性剪切带和塑流褶皱,随后形成同斜倒转褶皱及倒转翼沿劈理面上的推覆型韧性剪切带(雷世和等,1996;曾云,1998)。野外地质特征表明,构家河金矿床受控于近南北向 F₁ 韧性断层及其派生的张性次生构造中,矿体除了局部微小错动外整体较为平直,说明成矿在印支期后,且为流体提供上升通道和沉淀空间的脆性断裂亦为印支期后脆性剪切沿早期韧性剪切带叠加形成,为碰撞造山晚阶段韧性剪切变形后的挤压转换环境。因此,与前人认为的主要成矿期为印支晚期(田云华,1997)观点较一致。

成矿流体中金的搬运主要是金硫络合物和金氯络合物等形式进行运移(Zotov *et al.*, 1991; Benning and Seward, 1996),矿区地层中各类岩石 Au、Ag 含量均低于地壳克拉克值,特别是耀岭河群与陡山沱组 Au、Ag 含量与区域地层相比明显偏低,为“迁移贫化”的结果(田云华,1997),而巨粒黄铁矿的发育是变质流体沿层间滑脱面运移发生成矿物质富集的有力证明。同时成矿作用早期温度较高,指示可能发生了巨晶黄铁矿向磁黄铁矿的反应过程,

流体中形成稳定存在的硫络合物,随着主成矿期温度降低,硫络合物沉淀形成金和银。含矿变质热液流体沿断裂向上运移时不断萃取围岩中的成矿元素,并通过硫络合物形式搬运至有利于流体聚集和成矿物质卸载的空间,最终成矿物质沉淀、富集成矿。但是,该矿床部分流体盐度与均一温度呈弱相关性,具有流体混合的趋势(Kreuzer, 2005),C、H、O 同位素也显示该矿床早阶段以变质流体为主,晚阶段向大气降水演化,符合流体混合的金属元素沉淀机理特征(岳素伟等,2013)。此外,主矿体是构造蚀变岩型,围岩蚀变空间变化规律等表明水岩反应也参与了金属元素沉淀机制,因此,该矿床的流体混合和水岩反应是成矿物质沉淀方式。

综上,构家河金矿床成矿机制可能为:耀岭河群、陡山沱组地层在印支期秦岭陆陆造山变质峰期的进变质过程中,发生矿物重结晶及进变质反应并释放含矿变质流体,流体通过剪切带的运移至成矿位置,且含矿构造的脆-韧性特征表明其浅部同时有一定的大气水成分,变质流体与大气降水等流体混合且与围岩发生水岩反应,改变原始含矿流体的物理化学性质,导致矿化的发生及围岩蚀变。

5.3 矿床成因类型

原生金矿床类型可分为造山型、卡林型-类卡林型、斑岩型、浅成低温热液型、铁氧化物型、矽卡岩型、VMS/Sedex 型等主要类型,它们有着各自的成矿特征及形成环境(陈衍景等,2007)。其中造山型

① 王宗起,武昱东,王 刚,等. 2016. 武当-桐柏-大别关键地区区域地质调查成果报告.

金矿是产于变质地体中受构造控制的脉状金矿床,在时间和空间上与板块俯冲增生或碰撞造山作用有关,矿床受控于脆性-韧性变形的转变带或转变期,金沉淀与构造变形作用同步,其实质是变质热液矿床(Groves *et al.*, 1998; Kerrich *et al.*, 2000),其成矿流体为中高温、低盐度、低密度变质流体,包裹体类型有 NaCl-H₂O、富 CO₂ 等类型,流体形成温度和压力变化范围较大,深可达 25 km 以上,浅至近地表(Goldfarb *et al.*, 2001; Groves *et al.*, 2003)。

前文研究表明,构家河金矿床赋矿围岩普遍经历了(低)绿片岩相变质作用;矿床展布受南北向区域大型滑脱韧性剪切带控制,矿体产状受与韧性剪切带伴生的脆性断层控制;矿石类型有蚀变岩型和石英脉型;围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化等;成矿流体具中温、低盐度特点,主要为变质热液流体;成矿时间上与秦岭造山作用时代一致,空间上坐落在增生杂岩带内。上述特征符合造山型金矿床范畴,虽然包裹体类型、均一温度及盐度等方面存在一定差异,这可能与成矿发生在前人重视不够的碰撞造山作用的挤压向伸展转变期有关,因为构造动力体制转换叠合在控制成矿过程的多种参数中可能起着根本的作用(Deng *et al.*, 2004)。综上所述,我们认为构家河金矿床符合造山型金矿床特征。

6 结论

构家河金矿床主成矿期石英-硫化物-金银矿化阶段和晚期石英-碳酸盐阶段流体包裹体和碳氢氧同位素研究表明,成矿流体由中温、低盐度的变质流体组成,流体混合和水岩反应可能是金属元素沉淀、富集成矿的机制。鉴于构家河金矿床成矿地质背景、成矿流体性质及成矿构造背景与机制均与造山型矿床一致或相似,可被视为广义的造山型矿床。

致谢 野外工作得到了郧西县国土资源局和郧西兴强金矿有限公司各位领导和同行的帮助,室内同位素和流体包裹体测试得到了核工业北京地质研究院分析测试研究中心刘牧老师的帮助。评审专家和编委对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示感谢。

References

- Benning L G and Seward T M. 1996. Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150 to 500°C and 500 to 1 500 bars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11): 1 849 ~ 1 871.
- Brown P E and Hagemann S G. 1995. MacFlincon and its application to fluids in Archean lode-gold deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3 943 ~ 3 952.
- Cai Zhiyong, Xiong Xiaolin, Luo Hong, *et al.* 2007. Forming age of the volcanic rocks of the Yaolinghe group from Wudang block, Southern Qinling Mountain: Constraint from grain-zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 620 ~ 625 (in Chinese with English abstract).
- Calyton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3 057 ~ 3 067.
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, *et al.* 2007. Diagnostic fluid inclusions of different type hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 085 ~ 2 108 (in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Wei Y G, *et al.* 2004. Metallogenic effect of transition of tectonic dynamic system[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 15(1): 23 ~ 28.
- Friedman I, O'Neil J R and Fleischer M. 1997. *Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest* [M]. US Geological Survey Professional Paper.
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geological time: A synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18: 1 ~ 75.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Miriam M, *et al.* 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1~5): 7 ~ 27.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, *et al.* 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploitation significance[J]. *Economic Geology*, 98(1): 1 ~ 29.
- Hall P L. 1988. Freezing point depression of NaCl - H₂O solution [J]. *Economic Geology*, 83(1): 197 ~ 202.
- Hoefs J. 2004. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Berlin: Springer.

- Hu Jianmin, Ma Guoliang, Gao Diansong, *et al.* 2000. Chronology of major geological events of the Wudang block in the south Qinling orogeny[J]. *Regional Geology of China*, 19(3): 318~324(in Chinese with English abstract).
- Hu Jianmin, Song Zixin and Guo Liyu. 1999. Extensional detachment structure on the northern margin of the Wudang massif, Hubeiprovince[J]. *Regional Geology of China*, 18(1): 39~45(in Chinese with English abstract).
- Jia Shaohua. 2015. Genesis Study of Liudou Gold Deposit and Yindong-gou Silver-polymetallic Deposit in Western Wudang area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Jiang Yaohui, *et al.* 2009. Jiaodong and Xiaozhiling: two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2727~2738(in Chinese with English abstract).
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, *et al.* 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl.): 1~68.
- Kreuzer O. 2005. Intrusion-hosted mineralization in the Charters Towers Goldfield, North Queensland: new isotopic and fluid inclusion constraints on the timing and origin of the auriferous veins[J]. *Economic Geology*, 100(8): 1583~1603.
- Lei Shihe and Tang Guiying. 1996. Study on structural deformation and tectonic compound in Wudang area, southern Qinling orogeny[J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 19(3~4): 278~284(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Cheng Jianping, Wang Xinhua, *et al.* 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25~36(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Ren Bangfang, Duan Ruichun, *et al.* 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 2192~2199.
- Liu Bin and Shen Kun. 1999. The Thermodynamics Base of Fluid Inclusion Thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang and Shan Qiang. 2015. Composition of ore forming fluids in metal deposits and fluid inclusion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1108~1116(in Chinese with English abstract).
- Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, *et al.* 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 21~32.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral System*[M]. Berlin: Springer.
- Qin Zhengyong, Chen Lindong, Liu Xingyi, *et al.* 2005. Structural types and ore - controlling process in Wudang area[J]. *Geological Survey and Research*, 28(1): 16~24(in Chinese with English abstract).
- Ramboz C, Pichavant M and Weisbrod A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data: II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility[J]. *Chemical Geology*, 37(1~2): 29~48.
- Schidlowski M. 1998. Beginnings of terrestrial life: problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios SPIE's international symposium on optical science, engineering, and instrumentation[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 3441: 149~157.
- Tian Yunhua. 1997. Geology-geochemistry and ore genesis of Liudou gold deposits in Yunxi county, Hubei province[J]. *Progress in Precambrian Research*, 20(3): 11~20(in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, Central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527~1546(in Chinese with English abstract).
- White E D. 1974. Diverse origins of hydrothermal ore fluids[J]. *Economic Geology*, 69(6): 954~972.
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55(1~4): 229~272.
- Xia Rui, Deng Jun, Qing Min, *et al.* 2013. The genesis of the Dachang gold ore field in Qinghai province: constraints on fluid inclusion geochemistry and H-O isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1358~1376(in Chinese with English abstract).
- Xu Tianwu, Zeng Jianhui, Zhang Yongwang, *et al.* 2009. Carbon and oxygen isotope features of carbonatite in the main fracture of Daba Mountains foreland structural belt and its fluid response[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 33(2): 34~39(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Xu Huifang, *et al.* 1997. Ductile Shear

- Zones in the Main Continental Mountain Chains of China and Their Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yue Suwei, Zhai Yuyang, Deng Xiaohua, *et al.* 2013. Fluid inclusion and H-O isotope geochemistry and ore genesis of the Yindonggou deposit, Zhushan County, Hubei, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 27~45 (in Chinese with English abstract).
- Zacharias J, Paterova B and Pudilova M. 2009. Mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope constraints on the genesis of the Roudny Au-Ag deposit, Bohemian Massif[J]. *Economic Geology*, 104(1): 53~72.
- Zeng Yun. 1998. Geotectonic characteristics and evolution in Wudang-Yunxian-Yunxi area, Hubei[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2: 60~66(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press(in Chinese).
- Zhang Ruibin, Liu Jianming and Ye Jie. 2003. C&O isotopic geochemistry of Shouwangfen copper deposit, Hebei province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(2): 122~126(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhu X Y, Chen F K, Nie H, *et al.* 2014. Neoproterozoic tectonic evolution of South Qinling, China: Evidence from zircon ages and geochemistry of the Yaolinghe volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 245: 115~130.
- Zoheir B A. 2008. Characteristics and genesis of shear zone-related gold mineralization in Egypt: A case study from the Um El Tuyor mine, south Eastern Desert[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 445~470.
- Zotov A V, Baranova N N, Dar'Yina T G, *et al.* 1991. The solubility of gold in aqueous chloride fluids at 350~500°C and 500~1 500 atm: thermodynamic parameters of AuCl₂(sol) up to 750°C and 500 atm[J]. *Geochemical International*, 28: 63~71.
- 附中文参考文献**
- 蔡志勇,熊小林,罗洪,等. 2007. 武当地块耀岭河群火山岩的时代归属:单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. *地质学报*, 81(5): 620~625.
- 陈衍景,倪培,范洪瑞,等. 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2 085~2 108.
- 胡健民,马国良,高殿松,等. 2000. 武当地块主要地质事件年代学研究[J]. *中国区域地质*, 19(3): 318~324.
- 胡健民,宋子新,郭力宇. 1999. 湖北武当地块北缘伸展滑脱构造特征[J]. *中国区域地质*, 18(1): 39~45.
- 贾少华. 2015. 武当西缘六斗金矿及银洞沟银多金属矿床成因研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,等. 2009. 胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. *岩石学报*, 25(11): 2727~2738.
- 雷世和,唐桂英. 1996. 南秦岭造山带武当地区构造变形及构造复合[J]. *河北地质学院学报*, 19(3~4): 278~284.
- 凌文黎,程建萍,王歆华,等. 2002. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. *岩石学报*, 18(1): 25~36.
- 刘斌,沈昆. 1999. 流体包裹体热力学基础[M]. 北京:地质出版社.
- 卢焕章,单强. 2015. 金属矿床的成矿流体成分和流体包裹体[J]. *岩石学报*, 31(4): 1 108~1 116.
- 秦正永,陈林栋,刘兴义,等. 2005. 武当地区构造类型及其控矿作用[J]. *地质调查与研究*, 28(1): 16~24.
- 田云华. 1997. 湖北郧西六斗金矿床地质地球化学及矿床成因研究[J]. *前寒武纪研究进展*, 20(3): 11~20.
- 王宗起,闫全人,闫臻,等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. *地质学报*, 83(11): 1 527~1 546.
- 夏锐,邓军,卿敏,等. 2013. 青海大场金矿田矿床成因:流体包裹体地球化学及 H-O 同位素的约束[J]. *岩石学报*, 29(4): 1 358~1 376.
- 徐田武,曾溅辉,张永旺,等. 2009. 大巴山前陆构造带主断裂碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其对流体的响应[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 33(2): 34~39.
- 许志琴,张建新,徐惠芳,等. 1997. 中国主要大陆山链韧性剪切带及其动力学[M]. 北京:地质出版社.
- 岳素伟,翟涓阳,邓小华,等. 2013. 湖北竹山县银洞沟矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. *岩石学报*, 29(1): 27~45.
- 曾云. 1998. 湖北武当-两郧地区地质构造基本特征及构造演化[J]. *华南地质与矿产*, 2: 60~66.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社.
- 张瑞斌,刘建明,叶杰. 2003. 河北寿王坟铜矿碳-氧同位素地球化学特征及其意义[J]. *矿产与地质*, 17(2): 122~126.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社.