

编号: 0258-7106(2012)01-0083-11

山西省义兴寨金矿流体包裹体特征及其地质意义*

路英川^{1,2}, 葛良胜², 申维¹, 王治华², 郭晓东², 王梁^{1,2}, 周传芳^{1,3}

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国人民武装警察部队黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000; 3 中国人民武装警察部队黄金部队第三支队, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要 山西省繁峙县义兴寨金矿为一大型石英脉型矿床。对义兴寨矿区金矿石中的流体包裹体进行了岩相学和显微测温研究, 结果表明: 义兴寨金矿各成矿阶段金矿石中的流体包裹体主要为气液两相的 H₂O 包裹体, 其次为纯气相 H₂O 包裹体和含 CO₂ 包裹体。激光拉曼探针分析表明, 第 I 阶段流体包裹体除 SO₂ 特征峰外, 还出现了 CO₂ 特征峰和 C₆H₆ 特征峰, 第 II 阶段石英中流体包裹体的气相成分伴有一定量的 SO₂。第 I 阶段包裹体的完全均一温度(均一至液相)为 149~384℃, 第 II 阶段包裹体的完全均一温度(均一至液相或气相)为 151~373℃, 富气相包裹体多数在达到均一前发生爆裂, 第 III 阶段包裹体的完全均一温度(均一至液相)为 246~325℃, 第 IV 阶段包裹体的完全均一温度(均一至液相)为 223~269℃。成矿流体为中温、低盐度的浆控热液, 主成矿期发生流体沸腾并在第 II 阶段有不同来源流体混入, 后期有大气降水的加入。早期成矿阶段的流体具有深部地壳甚至地幔的特征。

关键词 地球化学; 流体包裹体; 成矿流体; 义兴寨; 山西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Characteristics of fluid inclusions of Yixingzhai gold deposit in Shanxi Province and their geological significance

LU YingChuan^{1,2}, GE LiangSheng², SHENG Wei¹, WANG ZhiHua², GUO XiaoDong²,
WANG Liang^{1,2} and ZHOU ChuanFang^{1,3}

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083; 2 Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, Hebei, China; 3 No. 3 Gold Geological Party of CAPF, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

Abstract

The Yixingzhai gold deposit is a large-size quartz-vein type ore deposit. The ore microscopy and measured temperature data of fluid inclusions reveal that inclusions at various ore-forming stages of the Yixingzhai gold deposits are mainly gas-liquid two-phase (H₂O or H₂O-CO₂) inclusions and subordinately pure volatile inclusions. Raman analysis of the fluid inclusions indicates that, in the gaseous phase, SO₂, CO₂ and C₆H₆ are existent at ore-forming stage I, and SO₂ is existent at stage II in addition to water vapor. The homogenization temperatures of ore-forming stage I are 149~384℃ (homogenization to liquid), and those of stage II are 151~373℃ (homogenization to liquid or gas). Volatile-rich fluid inclusions are mostly decrepitated before homogenization. The homogenization temperatures of stage III are 246~325℃ (homogenization to liquid), and those of stage IV are 223~269℃ (homogenization to liquid). The ore-forming fluids are of the epithermal-mesothermal and low salinity hypothermal system. The ore-forming fluids boiled very impetuously at the main stage, the meteoric water participated the activity during the late stage, and the ore-forming fluids were mixed with other fluids from

* 本文得到全国危机矿山接替资源勘查项目(20089925)和国家自然科学基金项目(批准号 41172302)的资助

第一作者简介 路英川,男,1986年生,硕士研究生,助理工程师,研究方向为成矿规律与矿产预测。Email: Luyingchuan1986@163.com

收稿日期 2011-03-14; 改回日期 2011-10-29。张绮玲编辑。

different sources at stage II. The reducibility of the early ore-forming stage fluid came from continental deep crust or the mantle.

Key words: geochemistry, fluid inclusion, ore-forming fluid, Yixingzhai, Shanxi Province

山西省五台山—恒山地区是中国重要的金矿床密集区(刘清泉,2011),义兴寨金矿位于晋东北恒山脉中段南侧,是目前山西省规模最大的金矿山。前人对义兴寨金矿床的地质地球化学(李双保等,1997;叶荣等,1999)、地球化学动力学(叶荣等,1997,2002)、成矿物质来源(景淑慧,1986)以及矿物特征(姜绍飞等,1995;李成禄等,2009a;李成禄,2009b)等进行过深入的研究,但是对矿石中流体包裹体的探讨尚少(杨红英等,1995;叶荣等,1999),尤其缺少对不同阶段流体特征的研究。由于流体包裹体特征是厘定矿床成因类型的重要标志(陈衍景等,2007),被喻为成矿溶液的原始样品,可以作为译解成矿作用的密码(何知礼,1982),其数据被用来确定流体系统演化的特征(Vapnik et al.,2002),对于矿床成因的研究具有重要意义。本文通过流体包裹体岩相学鉴定、冷热台测温以及激光拉曼光谱测定等方法,对义兴寨金矿不同成矿阶段矿石中的流体包裹体进行研究,这对揭示流体演化过程具有重要意义。

1 区域及矿床地质

义兴寨金矿位于山西省繁峙县砂河镇,大地构造位置属华北地台北中部,系山西陆台五台隆起西北侧与燕山沉降带西南缘嵌接部位。在约30亿年的地质发展过程中,该区经历了复杂的构造、沉积、岩浆、变质和成矿等地质作用。其早期经历了结晶基底形成和多期区域变质作用,中生代转入复杂的陆内造山作用过程,尤其在燕山运动中剧烈活化,形成了斜切晋东北的区域性构造-岩浆-多金属成矿带,成为金、银、铅、锌等矿产的重要产区(彭大明,1995;周绍芝,1999)。

矿区出露的地层主要为寒武系下统毛庄-馒头组泥质白云岩、长城系高于庄组白云质碳酸盐岩和五台超群金刚库组黑云斜长片麻岩。区域内岩浆岩较为发育,从前五台期、五台期、吕梁期至燕山期和喜马拉雅期均有岩浆活动(杨红英等,1995)。区域内构造表现为多期、多次褶皱变形和断裂活动,前五台—吕梁期以褶皱构造为主导形式,经多期次活动,形成义兴寨矿田NEE向复背斜基底构造。断裂构

造主要为NW向、NNW向2组,是区内重要的控岩控矿构造,对区域及矿区岩浆活动和金多金属矿化具有直接控制作用。NW向断裂具张剪性正断层性质,其中被各种矿脉充填。近矿围岩为恒山杂岩中的变闪长岩—黑云斜长片麻岩和长英质片麻岩。

区内岩浆岩主要为燕山期中酸性岩。与矿化有关的有酸性次火山岩和以闪长岩为主体的中酸性侵入杂岩——孙庄岩体。前者侵入顺序为:长石石英斑岩→石英斑岩→长石斑岩,早期伴随爆破相角砾岩;后者为区内的主要岩浆岩,展布于NW向区域控矿断裂带上,岩性以石英二长闪长岩为主体,岩性变化大且规律性不明显,在岩体内接触带分布有多种Au、Mo、Pb-Zn、Fe-Au矿(化)点。义兴寨金矿床产于孙庄岩体的NW部,岩体的SE部为辛庄金矿床,岩体和矿体均受义兴寨断裂控制。

区内断裂构造以义兴寨断裂和龙山断裂为代表,走向一般305~335°,倾向南西,倾角65~85°,断裂带宽一般数米至十余米,由大小不等、杂乱分布的构造角砾岩组成。两条断裂曾在燕山期发生走滑运动,中间派生出一组近SN向的张性裂隙,被后期含矿热液充填形成义兴寨和辛庄金矿的金矿体(图1)。本区金矿体的产出类型有多金属硫化物热液脉型(包括石英脉型和石英脉-构造蚀变岩复合型)及隐爆角砾岩型,其中石英脉型为主要类型。矿区详细编录的含金石英脉型矿体有15条,其中5、6、7号脉为该矿区主要矿脉。矿脉大多呈NNW向近等距平行排列,由倾角为80~90°的压-张扭性容矿断裂构成。矿体以单脉型为主,有简单复脉,网脉较少,规模大小不一,在垂向上多呈雁行状分支复合产出。金矿体由含黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物的石英脉构成。矿脉两侧围岩发生绢云母化、绿泥石化等蚀变。矿石类型主要有贫金贫硫化物石英型矿石、贫金黄铁矿方解石型矿石、富金银黄铁矿-多金属混合型矿石、富金黄铁矿、黄铜矿型矿石和贫金富银方铅矿闪锌矿型矿石。金矿矿石的构造类型有梳状、晶簇状、浸染状、网脉状、条带状、角砾状等;结构类型主要有他形-半自形-自形粒状结构、压碎结构、交代残余结构和溶蚀结构等,也可见文象结构、假象结构以及固溶体分离结构等。

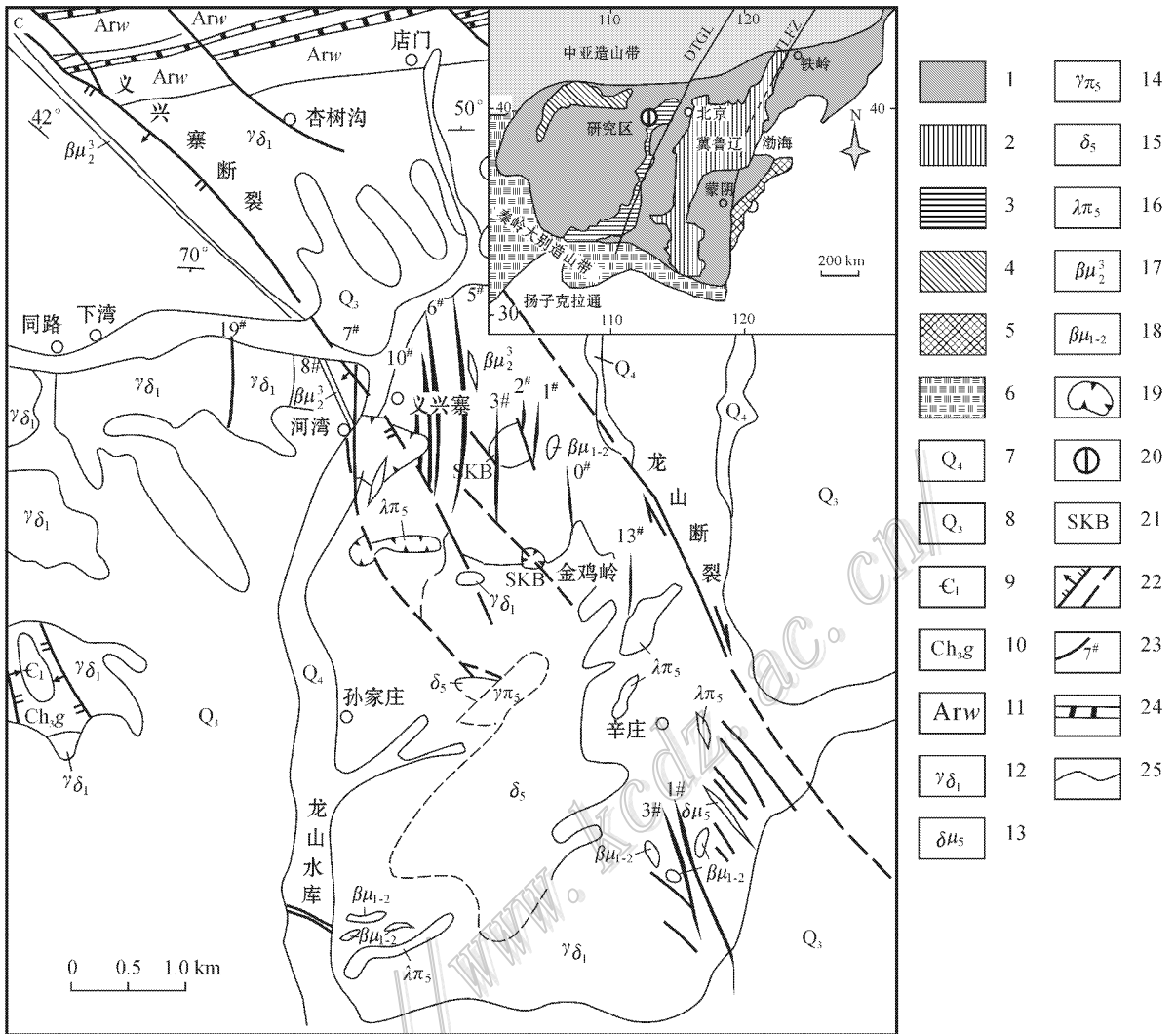


图 1 义兴寨金矿区地质略图(据叶荣等,1997;1999)及华北克拉通的三分(东部陆块、西部陆块和中央带)以及新生代裂谷系分布图(据 Zhao et al. 2001 修编)

1—太古代地体；2—华北裂谷系；3—山西-陕西裂谷系；4—银川河套裂谷系；5—苏鲁超高压变质带；6—中生代侵入带-秦岭大别造山带；7—第四系冲、洪积层；8—第四系黄土、亚砂土；9—寒武系下统毛庄-馒头组泥质白云岩；10—长城系高于庄组白云质碳酸盐岩；11—五台超群金刚库组黑云斜长片麻岩；12—太古界斜长片麻岩夹变粒岩；13—燕山期闪长玢岩脉；14—燕山期似斑状花岗岩；15—燕山期孙庄闪长杂岩体；16—燕山期长石石英斑岩；17—五台期辉绿岩；18—变基性岩；19—隐爆角砾岩筒；20—金矿点；21—砂卡岩化隐爆角砾岩；22—实测和推测断层；23—含金石英脉及编号；24—磁铁矿石英岩；25—地层界线；DTGL—大兴安岭-太行山重力梯度带；TLFZ—郯庐断裂带

Fig. 1 Generalized geological map of the Yixingzhai gold orefield (after Ye et al. ,1997 ;1999) and three subdivisions of the North China craton and the distribution of Cenozoic rift systems (after Zhao et al. ,2001)

1—Archean terrane；2—North China rift system；3—Shanxi-Shaanxi rift system；4—Yinchuan and Hetao plain rift system；5—Sulu ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic terrane (The Central Asian orogenic belt)；6—Mesozoic invasion zone (Qinling Mountains Dabie orogenic belt)；7—Quaternary alluvium and proluvium；8—Quaternary loess and subsand；9—Lower Cambrian Maozhuang-Mantou Formation muddy dolomite；10—Gaoyuzhuang Formation carbonate rocks of Changcheng System；11—Jinganku Formation biotite plagioclase gneiss of Wutai Supergroup；12—Archean plagiogneiss intercalated with leptynite；13—Yanshanian dioritic porphyrite dike；14—Yanshanian porphyritoid granite；15—Yanshanian Sunzhuang dioritic complex；16—Yanshanian feldspar-quartz porphyry；17—Diabase of Wutai period；18—Metabasite；19—Cryptoexplosion breccia pipe；20—Gold ore spot；21—Skarnized cryptoexplosion breccia；22—Fault and inferred fault；23—Gold-bearing quartz vein and its serial number；24—Magnetite quartz rock；25—Stratigraphic boundary；DTGL—Da Hinggan Ling and Taihang Shan gravity lineament；TLFZ—Tan-Lu fault zone

从义兴寨矿区矿脉的穿切关系及矿化特点,可以确立金多金属矿化的多阶段性,但早期矿化的多阶段性,由于后期矿化叠加或破坏已难以确定。宏观上,近南北向矿脉多切割了北西向矿脉(局部亦见相反者),可能表明北西向矿脉稍早形成。

根据野外脉体穿插关系等地质特征,以及对矿石光片的鉴定和分析,结合叶荣等(1997)的研究成果,将成矿划分为4个成矿阶段:第Ⅰ阶段,为含浸染状黄铁石英脉阶段,其中黄铁矿含量低,并呈零星浸染状分布,矿物组合为黄铁矿、黄铜矿和辉铜矿等(图2a、2e、2f);第Ⅱ阶段,为块状黄铁石英脉阶段,石英-黄铁矿-银金矿、自然金组合,以大量出现团块状粗粒黄铁矿为标志,形成黄铁矿的团块状集合体,并胶结了破碎的早期石英脉碎块,矿物共生组合为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等(图2b、2g、2h);第Ⅲ阶段,为多金属硫化物石英脉阶段,又可根据矿石结构构造与穿插关系证据分为Ⅲ₁、Ⅲ₂两个亚阶段:Ⅲ₁是本区金矿化的主要阶段之一,石英和方铅矿含量低是本阶段的主要标志,以形成中细粒黄铁矿、黄铜矿集合体为标志,除石英、黄铜矿、黄铁矿为主外,其次有辉铜矿、闪锌矿,矿物组合为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、雌黄和自然金(图2c、2i、2j、2k),其中自然金以包体金或单颗粒的形式产于黄铁矿中;Ⅲ₂阶段的矿物组合宏观上与Ⅲ₁阶段相同,微观有低成色银金矿、金银矿、辉银矿-螺状硫银矿、自然银、闪锌矿、方解石、白云石等,但石英含量增加,方铅矿常呈大颗粒团块状,或呈石英方铅矿脉,其内常有早期黄铁矿团块的角砾或石英呈脉或网脉状穿切于早期的黄铁矿团块中,该阶段矿物组合在矿区多见于脉带上部。第Ⅳ阶段,为石英-碳酸盐脉阶段,矿脉中常见晚期石英胶结早期石英晶体残块,矿物共生组合主要为石英、方解石、黄铁矿、黄铜矿和少量的铜蓝(图2d、2l)。

2 流体包裹体研究

2.1 样品采集及研究方法

样品为采自6号脉830中段(样品号YXC6-01)的浸染状黄铁石英脉(图2a)、5号脉的褐铁石英脉(样品号YXC5-02)、1号脉的块状黄铁石英脉(样品号YXC1-04)(图2b)、7号脉的多金属硫化物石英脉(样品号YXC7-01)(图2c)、3号隐脉(指脉体名称)的多金属硫化物石英脉(样品号YXCm3-

01)及7号脉的方解石石英脉(样品号YXC7-02)及0号隐脉的方解石石英脉(样品号YXCm0-02)(图2d)。共完成7件样品的测温(均一温度、冰点和爆裂温度)工作。

显微测温工作在中国地质大学(北京)地球化学流体包裹体实验室完成,所使用的仪器为Linkam THMSG-600冷热台(-196~+600℃)。测定前,首先应用了人造纯H₂O及 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为25%的H₂O-NaCl包裹体(国际标样),对流体包裹体的参数进行了系统校正。流体包裹体测试过程中,升温速率一般为0.2~5℃/min,误差为±0.1℃。

2.2 流体包裹体岩相学特征

本次研究以Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ阶段矿石石英内的流体包裹体为主要研究对象。首先,将上述阶段矿石样品制成双面抛光的包裹体薄片,然后在光学显微镜下观察,以确定不同成矿阶段,不同类型包裹体的特点。流体包裹体岩相学观察显示:石英内的流体包裹体(图3)较小,且形状多为不规则状。既有沿晶带分布的或孤立散乱分布的原生包裹体,又有沿裂隙分布的次生、假次生包裹体;在物相上,原生包裹体主要为气-液两相包裹体、富气相包裹体和富液相包裹体,其次为含CO₂包裹体或SO₂包裹体,未见到含子晶包裹体。本文主要研究不同成矿阶段的原生包裹体,其特征分述如下。

第Ⅰ阶段,含浸染状黄铁石英脉中的包裹体主要含有富液相的气、液两相包裹体(L+V)(含量约大于98%)。单个包裹体主要为椭圆形、三角形、长条状和不规则状,大小为3~12 μm,少量为15 μm左右(图3a、3b、3c、3d)。规则状约占流体包裹体总数的20%,不规则状约占流体包裹体总数的80%。其气相分数(V/V+L)为5%~90%,主要集中在10%~30%。

第Ⅱ阶段,块状黄铁石英脉中的包裹体含有纯气相包裹体(V)(含量约少于2%)、富气相(含量约少于25%)和富液相的气液两相包裹体(L+V)(含量约为70%)。单个包裹体主要为不规则状,含有少量的长柱形、椭圆形和菱形包裹体,大小为5~15 μm,少量为40 μm左右(图3e、3f、3g、3h)。其气相分数为5%~100%,集中在20%~40%。

第Ⅲ阶段,多金属硫化物石英脉中的包裹体主要为气液两相包裹体(L+V),包括富气相包裹体(含量约少于5%)和富液相包裹体(含量约为95%)。单个包裹体主要为不规则状,椭圆形和菱形,

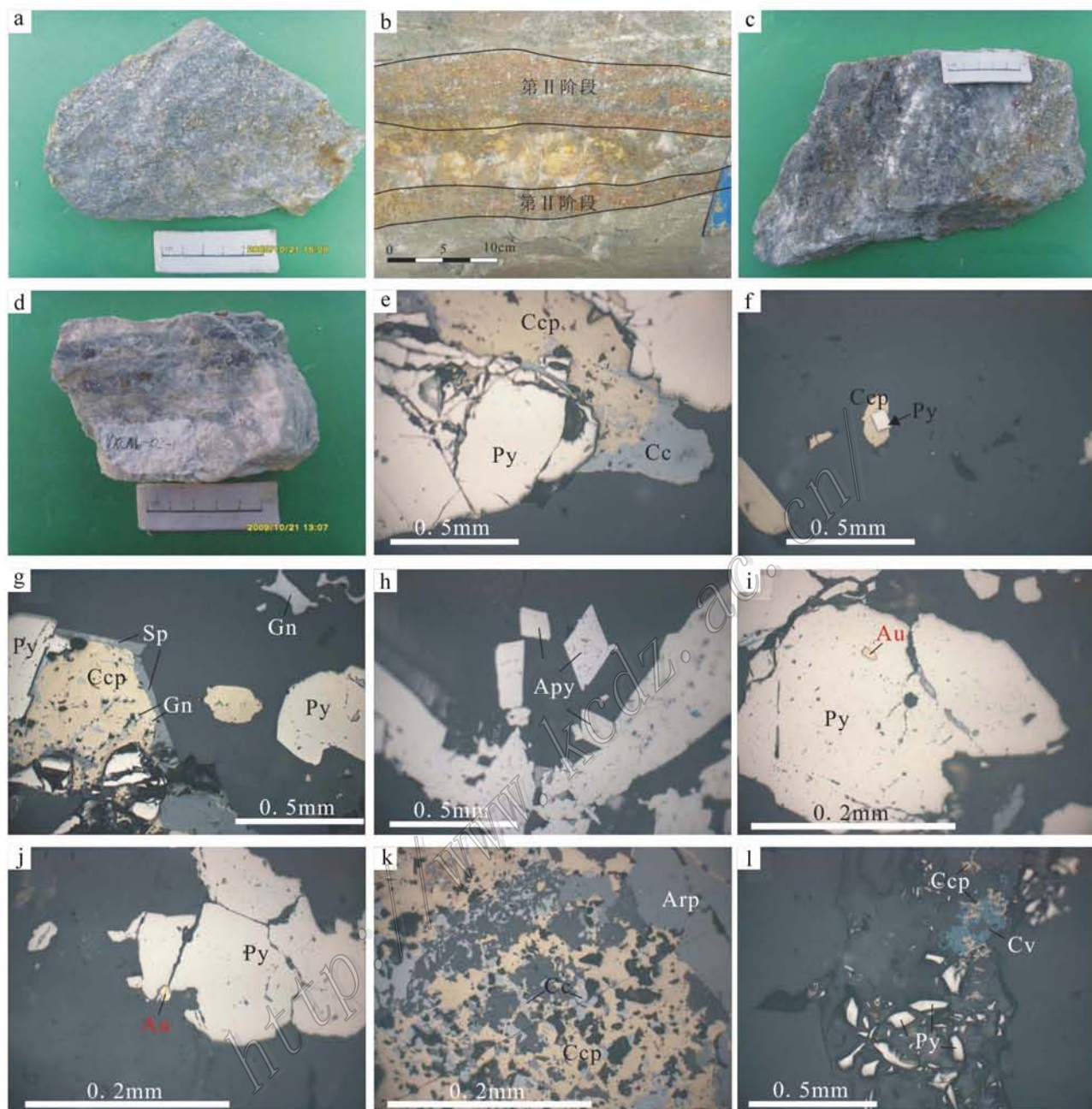


图2 义兴寨金矿矿石手标本及显微照片

a~d为手标本照片: a. 含浸染状黄铁矿石英英脉矿石(YXC6-01); b. 块状黄铁矿石英英脉矿石(YXC1-4); c. 多金属硫化物石英英脉矿石(YXC7-01); d. 石英-碳酸盐脉矿石(YXCm0-02); e~l为光片显微照片: e, f. 金属矿物为黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、辉铜矿(Cc)(YXC6-01); g, h. 主要为黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、方铅矿(Gn)、闪锌矿(Sp)、毒砂(Apy)(YXC1-04); i. 包体金(YXC7-04); j. 单颗粒金(YXC7-04); k. 金属矿物为辉铜矿(Cc)、雌黄(Arp)、黄铜矿(Ccp)(YXC6-02); l. 金属矿物为黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、铜蓝(Cv)(YXC20-2)

Fig. 2 Hand specimens and microphotographs of ore veins in the Yixingzhai gold deposit

a~d: Hand specimens: a. Grain-disseminated pyrite-quartz ore veins (YXC6-01); b. Massive pyrite-quartz ore veins (YXC1-4); c. Quartz-poly-metallic-sulfide ore veins (YXC7-01); d. Quartz-carbonate ore veins (YXCm0-02); e~l: Microphotographs: e, f. Metallic minerals comprising pyrite (Py), chalcopyrite (Ccp) and chalcocite (Cc); g, h. comprising mainly pyrite (Py), chalcopyrite (Ccp), galenite (Gn), sphalerite (Sp) and arsenopyrite (Apy) (YXC1-04); i. inclusion gold; j. single-grained gold (YXC704); k. Metal minerals comprising chalcocite (Cc), orpiment (Arp), chalcopyrite (Ccp)(YXC6-02); l. Metal minerals comprising pyrite (Py), chalcopyrite (Ccp) and covellite (Cv)(YXC20-2)

大小为 $2\sim 12\ \mu\text{m}$,少量为 $25\ \mu\text{m}$ 左右(图3i、3k、3l),规则状约占流体包裹体总数的25%,不规则状约占流体包裹体总数的75%(图3j、3l)。其气相分数为10%~80%,主要集中在15%~35%。

第IV阶段,方解石石英脉中的包裹体

石英中包裹体主要为气液两相包裹体(L+V),其中富气相包裹体含量约少于2%,富液相包裹体含量约为98%。单个包裹体主要为不规则状,少量为菱形和椭圆形,大小为 $4\sim 12\ \mu\text{m}$,少量为 $3\ \mu\text{m}$ 或 $20\ \mu\text{m}$ 左右(图3m、3n、3o)。规则状和不规则均约占流体包裹体总数的50%。其气相分数为2%~30%,主要集中在10%~20%。

方解石中包裹体很少,主要为富液相的气液两相包裹体。单个包裹体主要为菱形,长条状和不规则状,大小为 $4\sim 8\ \mu\text{m}$,少量为 $3\ \mu\text{m}$ 或 $10\ \mu\text{m}$ 左右(图3p)。其气相分数为5%~30%,主要集中在5%~10%。

2.3 流体包裹体显微测温、盐度和压力均一温度

第I阶段,含浸染状黄铁石英脉2个矿石样品的包裹体(样品号:YXC6-01,YXC5-02)完全均一温度测试结果分别为 $149\sim 368^\circ\text{C}$ 、 $233\sim 337^\circ\text{C}$;第II阶段,块状黄铁石英脉样中流体包裹体(样品号YXC1-4)有富液相和富气相两种,富液相包裹体均

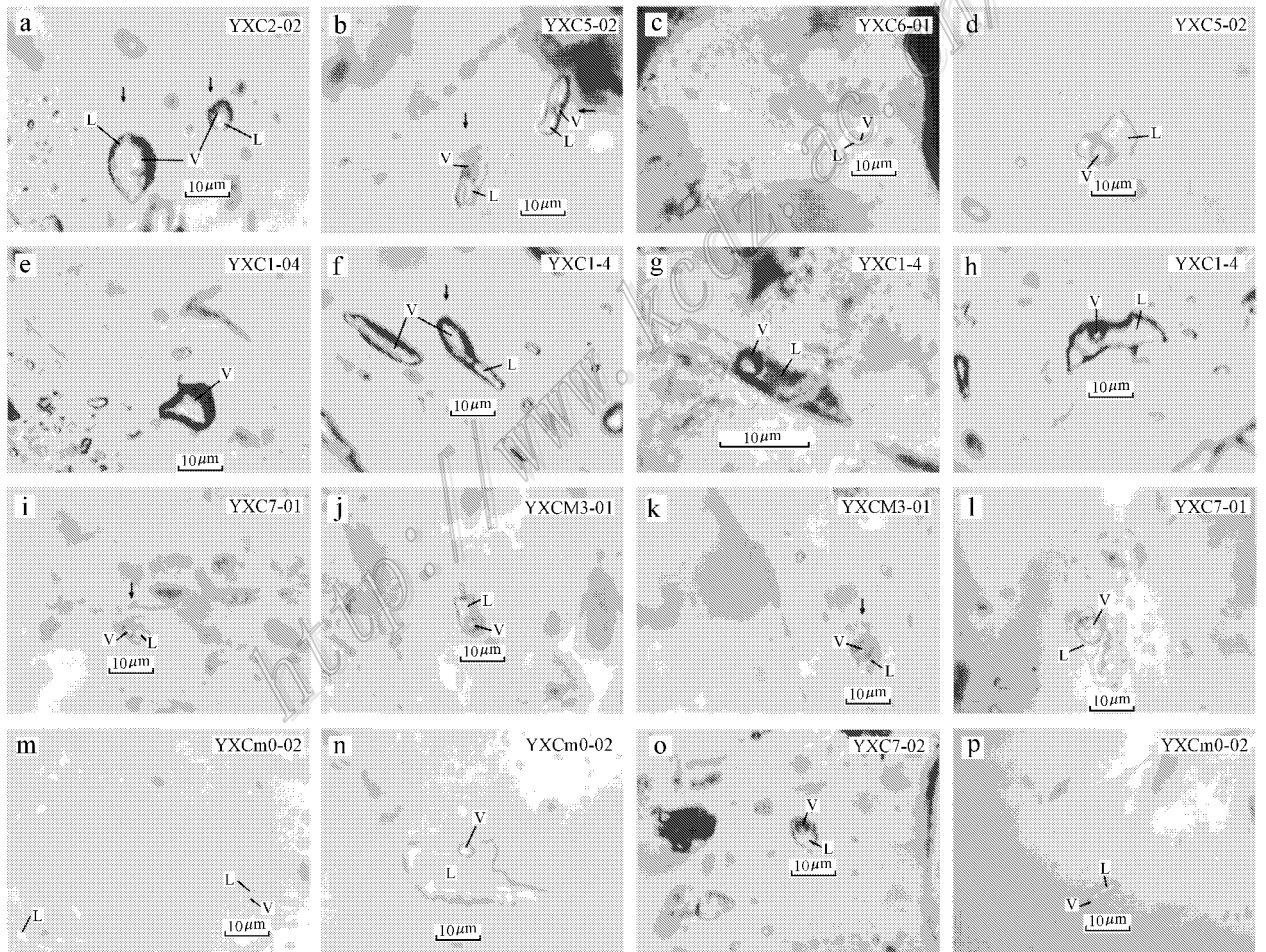


图3 义兴寨金矿石英中流体包裹体的显微照片

a. 气相 H_2O 包裹体;b. 富液相 H_2O 包裹体;c,d. 气液两相 H_2O 包裹体;e. 纯气相 CO_2 包裹体;f. 富气相 CO_2 包裹体;g. 气液两相含 CO_2 包裹体;h. 富液相含 C_6H_6 包裹体;i~l. 气液两相 H_2O 包裹体;m. 液相和气液两相 H_2O 包裹体;n~p. 富液相 H_2O 包裹体

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions in quartz from the Yixingzhai gold deposit

a. V-type H_2O fluid inclusions;b. L-type H_2O fluid inclusions;c,d. V-L H_2O fluid inclusions;e. V-type CO_2 fluid inclusions;f. CO_2 rich V-type fluid inclusions;g. V-L fluid inclusions with CO_2 ;h. L-type fluid inclusions with C_6H_6 ;i~l. V-L type H_2O fluid inclusions;m. L and V-L type H_2O fluid inclusions;n~p. L-type H_2O fluid inclusions

一至液相,完全均一温度为 151~373℃,富气相包裹体均一至气相(均一温度为 102℃)或达到均一前爆裂,爆裂温度为 68~387℃,主要集中在 304~313℃;第Ⅲ阶段,多金属石英脉矿石的 2 个样品(样品号 YXC7-01, YXCm3-01)中流体包裹体完全均一温度分别为 246~325℃和 192~329℃;第Ⅳ阶段,2 件方解石石英脉矿石样品(样品号 YXC7-02, YXCm0-02)中流体包裹体完全均一温度分别为 223~269℃和 95~329℃(表 1)。从 I~IV 阶段均一温度直方图(图 4)中可以看出,第 I 阶段均一温度主要集中在 250~300℃之间,峰值在 300℃;第 II 阶段均一温度也集中在 250~300℃,但是峰值向 250℃方向偏移,第 III 阶段均一温度主要集中在 250~300℃之间,且分布较为均匀;第 IV 阶段均一温度集中在 150~250℃,温度范围较宽且低。第 I~III 成矿阶段温度较为集中,第 IV 阶段温度下降明显。第 II、III 阶段为主成矿阶段,成矿温度集中在 250~300℃。

冰点温度与盐度

义兴寨金矿冰点温度直方图(图 5)和表 1 中显示:第 I 阶段冰点温度主要集中在 -5.5℃~-11.8℃,但是多数为 -6℃~-8℃;第 II 阶段冰点温度较高, -1.2℃~-4.7℃均有分布,但 > -2℃者居多;第 III 阶段的流体包裹体冰点温度集中分布

于 -6.5℃~-8.0℃之间;第 IV 阶段流体包裹体冰点温度为 -6.5℃~-10.1℃,主要分布于 -8.0℃~-10.0℃,较前三阶段有降低的趋势。

根据所测得的冰点温度数据,采用 Hall(1998)及 Bischoff(1991)的盐度公式,求得盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.07%~15.76%,第 I 阶段石英中流体包裹体 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 8.55%~15.76%,第 II 阶段盐度相对于其他三个阶段较低,为 2.07%~7.45%,第 III、IV 阶段盐度相差无几,分别为 9.86%~12.28%和 9.86%~14.04%(表 1)。图 6 显示,第 II 阶段的盐度较为分散,出现了中盐度与低盐度共存的现象。

密度与压力

据盐度及均一温度计算出各阶段的流体密度(表 1),从表 1 中可以看出各阶段的流体密度相差不大,第 I 阶段 2 个样品的流体密度平均值分别为 0.82 g/m³ 和 0.84 g/m³;第 II 阶段流体密度的平均值为 0.77 g/m³ 和 0.71 g/m³, III、IV 阶段流体密度均有升高的趋势,其平均值分别为 0.86 g/m³ 和 0.85~0.89 g/m³。由此可见,义兴寨金矿的各阶段成矿流体均为中低密度流体,且第 II 阶段有减小的趋势。

根据包裹体测温数据,利用 MacFlincon 流体包裹体计算程序(Brown et al., 1995),获得 I、II、III、IV 成矿阶段流体包裹体捕获压力分别为

表 1 义兴寨金矿流体包裹体特征及参数

Table 1 Characteristics and parameters of fluid inclusions in the Yixingzhai gold deposits

成矿阶段	样号	大小/ μm	气相分数/%	$t_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	$\rho/(\text{g}/\text{m}^3)$	$p/10^6\text{Pa}$	备注
				(测试个数)			平均值		
I	YXC6-01	3~12	5~30	149~368 (18)	-11.8~-5.7	8.81~15.76	0.72~0.98 0.82	35.00~188.97	部分与黄铁矿共生
	YXC5-02	3~16	10~30	233~337 (16)	-7.8~-5.5	8.55~11.46	0.8~1.14 0.84	27.31~148.78	
II	YXC1-4	5~15	5~100	151~373 (12)	-4.7~-1.2	2.07~7.45	0.80~0.94 0.77	47.66~98.06	部分达到均一温度前爆裂,爆裂温度 68~387℃
	YXC4-01	5~16	5~100	211~384 (12)	-2.6~-1.2	2.07~4.05	0.59~0.87 0.71	51.12~98.00	部分达到均一温度前爆裂
III	YXC7-01	2~12	10~20	246~325 (12)	-6.7~-8.0	9.98~11.46	0.79~1.18 0.86	43.26~111.02	
	YXCm3-01	2~12	15~80	192~329 (12)	-8.9~-6.5	9.86~12.28	0.79~0.96 0.86	12.11~116.66	部分均一到气相
IV	YXC7-02	4~10	10~20	223~269 (13)	-6.5~-8.8	9.86~12.62	0.87~0.93 0.89	22.63~49.88	
	YXCm0-02	2~12	2~30	95~329 (14)	-10.1~-7.2	10.73~14.04	0.81~0.98 0.85	13.98~115.04	部分达到均一温度前爆裂

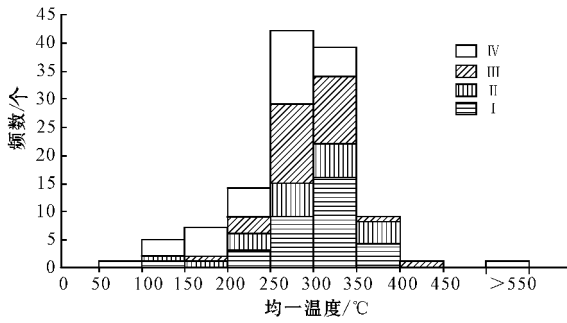


图4 义兴寨金矿床石英脉中流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Homogenization temperature of fluid inclusions in quartz from the Yixingzhai gold deposit

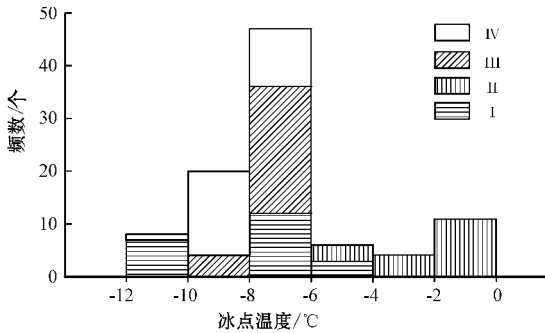


图5 义兴寨金矿床石英脉中流体包裹体冰点温度直方图

Fig. 5 Freezing point temperature of fluid inclusions in quartz from the Yixingzhai gold deposit

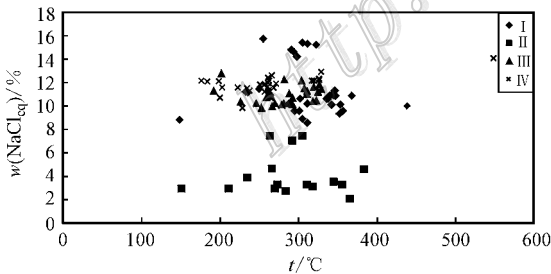


图6 义兴寨金矿床石英脉中流体包裹体盐度-均一温度图

Fig. 6 Salinity versus homogenization temperature of fluid inclusions from the Yixingzhai gold deposit

$27.31 \times 10^6 \sim 188.97 \times 10^6$ Pa, $47.66 \times 10^6 \sim 98.06 \times 10^6$ Pa, $12.11 \times 10^6 \sim 116.66 \times 10^6$ Pa, $13.98 \times 10^6 \sim 115.04 \times 10^6$ Pa。按静水压力梯度 10×10^6 Pa/km 计算,它们对应的成矿深度分别为 2.7~18.9 km、

4.8~9.8 km、1.2~11.7 km 和 1.4~11.5 km。由此可见,主成矿阶段的成矿深度基本一致,因此,推测该矿床的成矿深度为 4.8~11.7 km。

2.4 流体包裹体的激光拉曼光谱测试结果

本次研究开展了包裹体的激光拉曼光谱分析工作,对第 I、II 阶段中的石英包裹体个体分别测定了拉曼光谱。单个包裹体的激光拉曼探针分析在中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室英国 Renishaw 公司生产的 System-2 000 显微共焦激光拉曼光谱仪上完成,激发激光波长 514.53 nm,激光功率 20 mW,激光束斑最小直径 $1 \mu\text{m}$,光谱分辨率 $1 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$ 。

包裹体激光拉曼探针测试表明,第 I 阶段和第 II 阶段气相成分主要为水,在拉曼图谱上第 I 阶段的包裹体中除 SO_2 特征峰 (464 cm^{-1}) 外,还出现了 CO_2 特征峰 (1286 cm^{-1} 和 1388 cm^{-1}) 和 C_6H_6 特征峰 (3074 cm^{-1}) (图 7a、7b、7c),第 II 阶段除了寄主矿物石英的特征峰外,还出现了 SO_2 峰 (1147 cm^{-1}) (图 7d),未见 C_6H_6 和 CO_2 特征峰;这显示了成矿流体从早期以 H_2O 、 CO_2 和 SO_2 为主,到主成矿阶段时有机成分 C_6H_6 消失的特征。

3 讨论

3.1 成矿流体特征及演化

义兴寨金矿流体包裹体的研究表明,成矿流体属于中-高温、中低盐度和中低密度的热液。流体温度在成矿早期到晚期逐渐降低,250~300°C 代表了主成矿阶段(II、III)的流体温度,李成禄等(2009a)通过黄铁矿热电性的计算得出义兴寨金矿床的形成温度为 $143.3 \sim 323.3^\circ\text{C}$,与流体包裹体均一温度吻合较好。

从整个成矿过程来看,温度和盐度从早成矿阶段(I, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 8.55%~15.76%)到主成矿阶段(II, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 2.07%~7.45%; III, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 9.86%~12.28%)波动性较大,指示主成矿阶段时流体性质发生了较大波动,而从主成矿阶段后期(III)到晚成矿阶段(IV, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 9.86%~14.04%)流体盐度平稳过度,说明成矿流体晚期来源的稳定性特征(图 6)。结合密度变化特征可以推测,流体沸腾作用可能与区内较为频繁的构造、岩浆活动相关。

第 II 阶段包裹体有富气相和富液相包裹体共

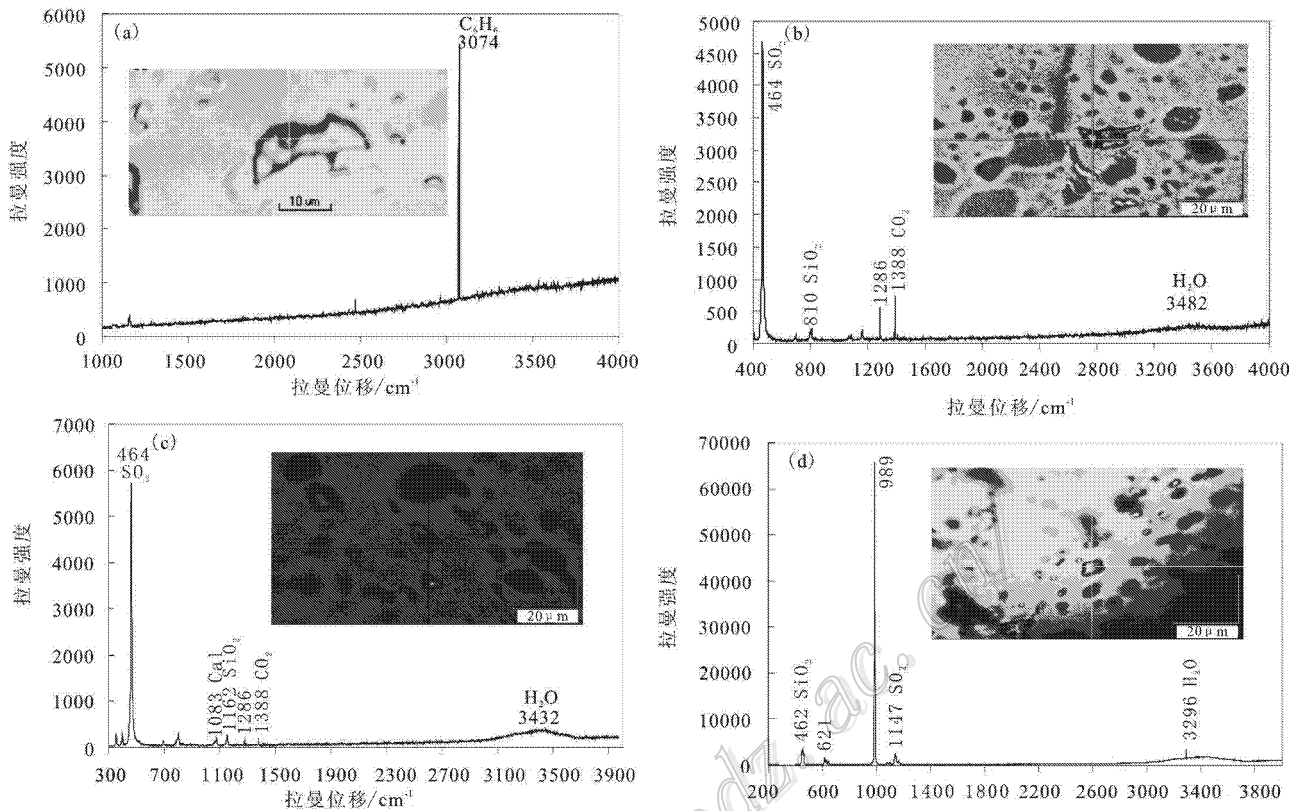


图 7 义兴寨金矿床石英脉中流体包裹体的拉曼图谱

(a)(b)(c). 第 I 阶段气液两相包裹体的气相成分 ;(d). 第 II 阶段富气相包裹体的气相成分

Fig. 7 Laser Raman spectra of fluid inclusions from the Yixingzhai gold deposit

(a),(b),(c). Vapor phase composition of liquid-gas two phase inclusions at stage I ;(d). Vapor phase composition of gas-rich inclusion at stage II

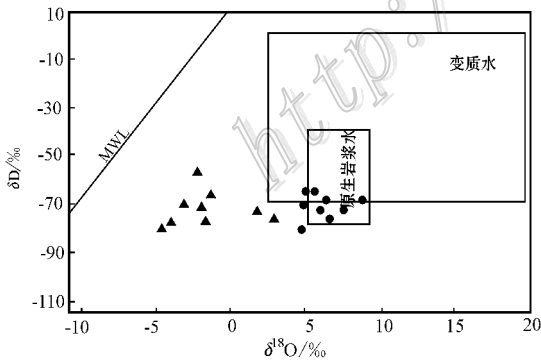


图 8 义兴寨金矿的 $\delta D-\delta^{18}O$ 图解(李双保等,1997)

●—早中期氧同位素值,▲—晚期氧同位素值

Fig. 8 $\delta D-\delta^{18}O$ diagram of the Yixingzhai gold deposit

●—Early to middle stage ;▲—Late stage

降低的特征,指示流体发生过沸腾作用(卢焕章,2001),也正是沸腾作用导致了金的沉淀成矿(胡芳芳等,2008),这与流体包裹体岩相学和盐度特征相互印证。

但是与 I、III、IV 阶段相比,II 阶段均一温度变化范围较为宽泛(151~384℃),压力虽有一定的降低,但是并不明显,尤其是盐度急剧下降($w(Na-Cl_{eq})$ 2.07%~7.45%)部分包裹体在均一前发生爆裂等特征,又表现出低盐度流体参与混合和包裹体的不均匀捕获的特征(Shepherd et al.,1985)。正是主成矿阶段的流体沸腾和外来低盐度流体的混合作用共同导致了金的沉淀,但是,主成矿阶段低盐度流体混合和不均匀捕获作用形成的义兴寨金矿这种特有形式,还需要进一步研究加以证实。

3.2 成矿流体来源及矿床成因

义兴寨成矿流体属中高温、中低盐度、中低密度流体,与早期岩浆水热液,后期有大气降水热液混入

存,富液相包裹体均一到液相,富气相包裹体均一到气相或发生爆裂,压力降低和气相体积增大,同时伴随流体中密度和低密度共存且相对于其他三个阶段

的特征一致,与山东玲珑金矿(王可勇等,2008)、焦家金矿(张海泉,2005)、三甲金矿(胡芳芳等,2008)和金岭金矿(王力等,2010)较为相似,符合浆控浅成中温热液型矿床成矿流体的特征。

一般认为,参与混合的中低盐度流体多为变质热液、改造热液以及大气降水等,但是近几年研究发现岩浆水(刘玄等,2011;周国发等,2008)、地幔流体(王力等,2010)同样可以形成低盐度金矿。同时,激光拉曼测试结果指示,第Ⅰ阶段气相成分复杂,除水蒸气为主外,还伴随有 SO_2 、 CO_2 和 C_6H_6 的特征峰, C_6H_6 的形成往往与还原环境(李永胜等,2011)有关,丰富的 CO_2 的出现可能与深部地壳甚至地幔流体的参与有关(孙晓明等,2010)。

除流体包裹体特征外,其他证据也表明该矿床属于浆控浅成中温热液型矿床:① 义兴寨矿区金矿氢、氧同位素证据: $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-65\text{‰} \sim -88\text{‰}$,与幔源流体氢同位素($\delta\text{D} = -50\text{‰} \sim -80\text{‰}$, Taylor, 1980)基本吻合, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $3.63\text{‰} \sim 10.46\text{‰}$,其在氢、氧同位素图解中落入岩浆水和变质水重叠区和紧邻的左下角(图8),而Ⅲ、Ⅳ含金石英脉中的石英、方解石流体包裹体同位素中流体水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-3.47\text{‰} \sim -1.87\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-56\text{‰} \sim -74\text{‰}$,具岩浆水与大气降水混合的特征(李双保等,1997;李成禄,2009b);② 杨红英等早在1995对义兴寨金矿区的多种硫化物含金石英脉矿石和黄铁矿含金石英脉矿石的流体包裹体进行了研究,曾发现过含子晶 NaCl 多相包裹体,包裹体类型特征发现含石英脉的流体包裹体与次火山岩脉花岗斑岩中的包裹体有类似现象,推测二者的热液是同源,并通过岩相学特征和测温等多种手段得到样品中有沸腾包裹体群的特征,且沸腾包裹体的沸腾机制是与热液在火山通道或断裂处压力骤降有关;③ 义兴寨金矿矿石的微量元素、稀土元素与周围岩体的微量元素和稀土元素分配特征有很好的一致性^①。

前人对义兴寨金矿成矿年龄曾做过详细研究。叶荣等(1999)测得Ⅱ成矿期石英的坪年龄为 $(131.4 \pm 3.1)\text{Ma}$,代表了主成矿期的年龄,从而定义义兴寨金矿形成于中生代。华北克拉通岩石圈在中生代发生了大规模减薄事件(Fan et al., 1992; Menzies et

al., 1993; Meyer et al., 1994; Harris et al., 1994; Fan et al., 2001; 吴福元等, 2003; zhai et al., 2007; 翟明国, 2008; 刘燊等, 2010),在此期间,构造运动使得大量的中酸性岩浆经过底侵作用进入到五台群等老变质地层内,并伴随深部流体向上运移,导致大规模的中酸性火山岩、次火山岩侵位事件及成矿作用发生,形成了一批金、银、铅-锌、铁等矿床。义兴寨金矿正是中温石英脉型金矿床中的一种。

4 结 论

(1) 义兴寨金矿床可分为4个矿化阶段,即含浸染状黄铁石英脉阶段、块状黄铁石英脉阶段、多金属硫化物石英脉阶段和方解石石英脉阶段,成矿早、中期气相分数从5%至100%均有分布,特别是第Ⅱ阶段气相分数明显增大(平均值为35.3%)。晚期(第Ⅳ阶段)包裹体中气相分数明显降低($<2\%$)。

(2) 流体包裹体均一温度为 $95 \sim 384^\circ\text{C}$,主成矿(第Ⅱ、Ⅲ)阶段的温度为 $250 \sim 300^\circ\text{C}$ 。各阶段流体包裹体盐度在成矿的第Ⅰ阶段最高,第Ⅱ阶段明显降低,第Ⅲ、Ⅳ阶段中等且相对稳定。

(3) 第Ⅰ阶段石英中流体包裹体盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $8.55\% \sim 15.76\%$,第Ⅱ阶段盐度相对其他三个阶段较低, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $2.07\% \sim 7.45\%$,第Ⅲ、Ⅳ阶段盐度相差无几, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 分别为 $9.86\% \sim 12.28\%$ 和 $9.86\% \sim 14.04\%$ 。根据压力计算该矿床的成矿深度为 $4.8 \sim 11.7\text{km}$,属于浆控浅成中温热液型矿床。

(4) 第Ⅰ阶段石英中流体包裹体除水蒸气之外,还出现了 SO_2 、 CO_2 、 C_6H_6 的特征峰,具有深部地壳甚至地幔的还原环境特征。

志 谢 在野外调查和实验室测试期间得到了义兴寨金矿曹荣秀副总工程师、张翔科长和中国地质大学诸惠燕老师的大力支持,激光拉曼测试中得到杜轶伦博士的热心帮助,在论文撰写过程中得到了两位匿名审稿老师和编辑老师的悉心指导,在此表示衷心感谢。

^① 武警黄金地质研究所. 2010. 晋东北-内蒙古中部地区火山岩型金多金属矿床成矿规律总结研究中期成果总结(义兴寨金矿及其外围专题). 内部资料.

参考文献/References

- 陈衍景,倪培,范宏瑞, Pirano F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 23(9): 2085-2108.
- 何知礼. 1982. 包体矿物学[M]. 北京:地质出版社. 1-304. 专题.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 于虎, 刘振豪, 宋林夫, 金成伟. 2008. 胶东三甲金矿床流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 24(9): 2037-2044.
- 姜绍飞, 杜振国, 刘之洋. 1995. 义兴寨金矿黄铁矿的标型特征及成因意义[J]. 矿产与地质, 9(3): 203-207.
- 景淑慧. 1986. 山西省繁峙县义兴寨金矿成矿条件及成矿来源探讨[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 13: 126-134.
- 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 宋继叶, 张聚全. 2009a. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与导型特征及其地质意义[J]. 现代地质, 23(6): 1056-1063.
- 李成禄. 2009b. 山西省繁峙县义兴寨石英脉型金矿成因矿物学研究及深部预测[D]. 北京:中国地质大学硕士学位论文. 59-65.
- 李双保, 李俊建. 1997. 山西恒山义兴寨脉金矿田成矿地球化学特征[J]. 前寒武纪研究进展, 20(2): 1-21.
- 李永胜, 赵财胜, 吕志成, 严光生, 甄世民. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 41(1): 123-136.
- 刘清泉. 2011. 山西辛庄金矿地质特征、矿床成因及找矿预测研究[D]. 中南大学硕士学位论文. 1-97.
- 刘玄, 范宏瑞, 胡芳芳, 郑小礼, 蓝庭广, 杨奎峰. 2011. 胶东大庄子金矿成矿流体及稳定同位素研究[J]. 矿床地质, 30(4): 675-689.
- 刘燊, 胡瑞忠, 冯光英, 杨毓红, 冯彩霞, 齐有强, 王涛. 2010. 华北克拉通中生代以来基性岩墙群的分布及研究意义[J]. 地质通报, 29(2/3): 259-267.
- 卢焕章. 2001. 流体不混溶性和流体包裹体[J]. 岩石学报, 27(5): 1253-1261.
- 彭大明. 1995. 晋东北地区金矿类型及找矿方向[J]. 贵金属地质, 4(4): 263-268.
- 孙晓明, 韦慧晓, 翟伟, 贵勇, 梁业恒, 莫儒伟, 韩墨香, 张相国. 2010. 藏南邦布大型造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制[J]. 岩石学报, 26(6): 1672-1684.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 张瑾. 2006. 太行山地区中、新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化[J]. 岩石学报, 22(6): 1657-1664.
- 王可勇, 张春燕, 樊岳铭, 张晓东. 2008. 山东玲珑金矿床成矿流体地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 38(2): 194-201.
- 王力, 孙丰月, 王佳良. 2010. 山东金岭金矿床成矿流体地球化学特征[J]. 岩石学报, 26(12): 3735-3744.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 10: 51-60.
- 杨红英, 建国, 周军. 1995. 山西义兴寨金矿流体包裹体的特征及意义[J]. 贵金属地质, 4(3): 177-183.
- 叶荣, 赵伦山, 沈镛立, 王振海, 诸惠燕. 1997. 义兴寨金矿成矿作用地质地球化学动力学研究[J]. 现代地质, 11(1): 58-65.
- 叶荣, 赵伦山, 沈镛立. 1999. 山西义兴寨金矿床地球化学研究[J]. 现代地质, 13(4): 415-418.
- 叶荣, 涂光炽, 赵伦山, 沈镛立, 罗丽. 2002. 山西义兴寨金矿床金矿物颗粒的产出及其成矿动力学意义[J]. 矿床地质, 21(3): 278-303.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳[J]. 岩石学报, 24(10): 2185-2204.
- 张海泉. 2005. 山东省胶东地区焦家式金矿床中含石英大脉流体包裹体的特征[J]. 地质通报, 24(5): 456-461.
- 周国发, 吕古贤, 邓军, 申玉科, 郭涛. 2008. 山东三山岛金矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 现代地质, 22(1): 24-33.
- 周绍芝. 1999. 晋东北地区银(金)矿成矿特征及远景浅析[J]. 地质与勘探, 35(3): 5-8.
- Bischoff J L. 1991. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O solution: A P V T χ summary of from 300°C to 500°C[J]. Amer. J. Sci., 291: 309-338.
- Brown P E and Hagemann S G. 1995. MacFlincon and its application to fluids in Archean lode-gold deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 3943-3952.
- Fan W M and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and asthenosphere mantle beneath eastern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 16: 171-179.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin K and Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China[J]. Physics Chemistry Earth(A), 26: 733-746.
- Hall D L. 1998. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution[J]. Econ. Geol., 83: 197-202.
- Harris J W, Duncan D J and Zhang F. 1994. The physical characteristics and syngenetic inclusion geochemistry of diamonds from Pipe 50, Liaoning Province, People's Republic of China[A]. In: Meyer H O A and Leonardos O H, eds. Proc. 5th Int. Kimb Conf. 1. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration[C]. 106-115.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoproses and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China[A]. In: Prichard H M, et al. eds. Magmatic processes and plate tectonics[C]. London: Geological Society Special Publication. 76: 711-811.
- Meyer H O A, Zhang A and Milledge H J. 1994. Diamonds and inclusions in diamonds from Chinese kimberlites[A]. In: Meyer H O A and Leonardos O H, eds. Proc. 5th Int. Kimb Conf. 1. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration[C]. 98-105.
- Shepherd T J, RaKin A H and Alderton D H M. 1985. A practical guide to fluid inclusion studies[M]. Glasgow & London: Blackie & Son Limited. 1-154.
- Taylor H P. 1980. The effects of assimilation of country rocks by magma on ¹⁸O/¹⁶O and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr systematics in igneous rock[J]. Earth Planet Sci. Lett., 47: 243-254.
- Vapnik Y and Moroz I. 2002. Compositions and formation conditions of fluid inclusions in emerald from the Maria deposit (Mozambique) [J]. Mineralogical Magazine, 66(1): 201-213.
- Zhai M G, Kusky M, Santosh M and Xiao W J. 2007. Tectonic evolution of China and adjacent crustal fragments[C]. Gondwana Research, 12: 1-3.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 107: 45-73.