文章编号：1004-0609(2014)10-2609-12

山西辛庄金矿床成矿流体特征及矿床成因

郑明泓[1,2]，邵拥军[1,2]，赵晓霞[1,2]，刘忠法[1,2]

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室，长沙 410083；
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院，长沙 410083)

摘 要：辛庄金矿位于山西陆台五台隆起西北侧与燕山沉降带西南缘两大构造单元相互嵌接的中生代构造岩浆活动带上，矿体产状受 NNW 和 NW 向断裂控制。根据脉体穿切关系和矿物交代关系，可以将辛庄金矿分为早、中、晚 3 个成矿阶段。本区流体包裹体主要以气液两相包裹体为主，成矿温度有两个峰值：320~340 ℃和 220~260 ℃，分别对应石英−黄铁矿阶段和石英−多金属硫化物阶段，属于中高温的范围。包裹体气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主，并含有一定量的 CH_4 以及极少量的 H_2、C_2H_2 和 C_2H_6；液相成分主要有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+、SO_4^{2-}、Cl^-和 F^-。本区氢氧同位素组成表明成矿流体具有大气降水与深部岩浆流体混合特点。总体而言，辛庄金矿的初始流体具有中高温、富 CO_2、低盐度的流体特征，晚成矿阶段流体演化为低温、低盐度水溶液流体，流体的不混溶导致了主成矿期矿质的大量沉淀。辛庄金矿为与燕山期岩浆活动有关的热液型金矿床。

关键词：流体包裹体；成矿流体；矿床成因；辛庄金矿床
中图分类号：P611.1 **文献标志码**：A

Ore-forming fluid characteristics and ore genesis of Xinzhuang gold deposit, Shanxi province

ZHENG Ming-hong[1,2], SHAO Yong-jun[1,2], ZHAO Xiao-xia[1,2], LIU Zhong-fa[1,2]

(1. MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Xinzhuang gold deposit is located in the Mesozoic tectonic-magma activation area which is embedded by the two tectonic units-the northwestern Wutai uplifts of Shanxi platform and the southwestern Yanshanian subsidence belt. The occurrence of the ore body is controlled by NNW and NW faults. The crosscutting relationships and mineral replacement suggest that the ore forming process includes the earlier, middle and later stages. The fluid inclusions of the ore in this deposit are mainly the gas-liquid inclusions. The ore-forming temperatures have two peak values: 320−340 ℃ and 220−260 ℃, corresponding to the quartz-pyrite-chalcopyrite stage and the quartz-polymetallic sulfide stage, respectively, which indicates that the deposit belongs to the hypo-mesothermal gold deposit. The gas compositions in the fluid inclusions mainly include H_2O and CO_2, with trace CH_4 and H_2, C_2H_2 and C_2H_6. The liquid phase mainly contain Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, Cl^- and F^-. The composition of hydrogen and oxygen means the mixing of meteoric water and deep magmatic fluid. In general, the ore fluids in the early and middle stages are characterized by meso-to hypothermal CO_2-rich and low salinity, which are considered as the nature of metamorphic fluids, whereas the late-stage fluids are low temperature, low salinity and CO_2-poor. The fluid immiscibility causes gold precipitation in the middle-stage. The Xinzhuang gold deposit belongs to the quartz vein type related to the Yanshanian mediosilicic-acid magma activities.

Key words: fluid inclusion; ore forming fluid; ore genesis; Xinzhuang gold deposit

基金项目：国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB411405)；国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BA01B07)；国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(200911007-04)；国家危机办项目(20109901)；中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室发展基金资助项目
收稿日期：2014-03-11；**修订日期**：2014-07-22
通信作者：邵拥军，教授，博士；电话：13973149482；E-mail: shaoyongjun@126.com

辛庄金矿床位于华北克拉通中间带北部，在山西陆台五台隆起西北侧与燕山沉降带西南缘两大构造单元相互嵌接的中生代构造岩浆活动带上，该区是碰撞造山作用或陆内造山带作用较强的地区，属于华北陆块金矿成矿域的五台−吕梁成矿带[1−2]。研究者们[3−9]对辛庄金矿进行了矿床地球化学特征、成矿条件、矿物标型特征、控矿因素及矿床成因等方面的研究，研究程度相对较高，但关于成矿流体的研究程度还相对较低。成矿流体是一定地质作用的产物，矿床的形成过程与特定地质构造背景下成矿流体的产生、运移和聚集有着密切联系。因此，研究成矿流体有助于研究矿床的成矿物质来源、性质及成矿作用。基于此，本文作者对主成矿阶段矿物中的流体包裹体岩相学特征、显微测温、群体包裹体成分进行分析，对成矿流体的物理化学条件、来源、性质进行系统研究，为本区矿床成因研究提供依据。

1 区域地质背景

矿区地处恒山东段山西陆台与燕山沉降带两大构造单元相互嵌接的构造岩浆活动带上(见图 1)。在漫长地质发展演化过程中，该区经历了多期构造运动，形成了错综复杂的构造系统。

区域出露盖层主要有中元古界蓟县系雾迷山组、长城系高于于庄组和古生界寒武系以及新生界古近系

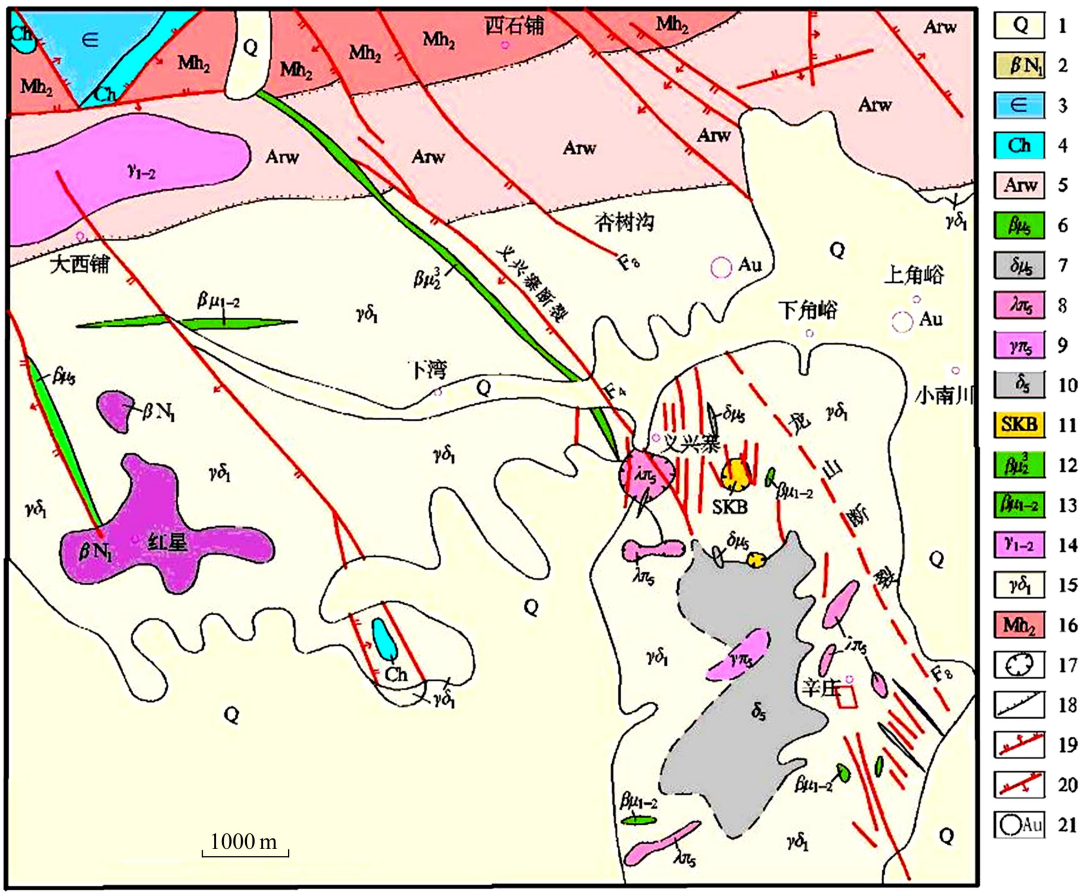


图 1 辛庄岩金矿床区域地质略图(据文献[9]修改): 1—第四系；2—第三系；3—寒武系；4—长城系；5—五台群；6—辉绿岩脉；7—闪长玢岩脉；8—浅成酸性岩；9—似斑状花岗岩；10—孙家庄闪长杂岩体；11—矽卡岩化隐爆角砾岩；12—变辉绿岩；13—变基性岩；14—花岗岩；15—义兴寨变闪长岩；16—前庄旺杂岩体；17—隐爆角砾岩筒；18—不整合线；19—正断层；20—逆断层；21—金矿点

Fig. 1 Regional geological sketch of Xinzhuang gold deposit (modified from Ref.[9]): 1—Quaternary; 2—Tertiary; 3—Cambrian; 4—Changcheng system; 5—Wutai group; 6—Diabase viens; 7—Diorite viens; 8—Hypabyssal acidic rock; 9—Porphyraceous granite; 10—Diorite complex rock mass of Sunjiazhuang; 11—Skarnization cryptoexplosion; 12—Epidiabase; 13—Metabasic rock; 14—Granite; 15—Epidiorite of Yixingzhai; 16—Composite pluton of Qianzhuangwang; 17—Crypto-explosionbreccia pipe; 18—Unconformity line; 19—Normal fault; 20—Reverse fault; 21—Gold occurrence

和第四系。新太古界地层主要为黑云角闪斜长片麻岩，局部夹薄层浅粒岩；新元古界地层岩性主要为灰岩、石英砂岩夹燧石条带；古生界地层岩性以灰−深灰色薄板状灰岩为主；新生界地层中古近系岩性主要为玄武熔岩，第四系为现代冲、洪积砂及砂粒松散堆积物。义兴寨断裂、龙山断裂这两条北西向大断裂构成本区断裂的基本格架，它们控制着与其伴生的北北东(NNE)、北北西(NNW)两组断裂的分布，也控制了中生代岩体的产出和义兴寨—辛庄金矿带的展布。区内岩浆活动较为强烈，前五台期、五台期、吕梁期、燕山期到喜山期岩浆岩均有出露，其中燕山期中酸性岩浆岩分布较广。岩性从超基性、基性到中酸性－酸性均有产出。与矿化有关的岩体为酸性次火山岩和以闪长岩为主体的浅成侵入杂岩体。

2　矿床地质特征

辛庄金矿床产于孙家庄闪长杂岩体的东南部，与产于孙家庄闪长杂岩体东北部的义兴寨金矿床同受北西(NW)向义兴寨断裂和龙山断裂控制(见图 2)。

矿区内地层主要为太古代老变质岩系、元古代碳酸盐岩和中生代火山岩系地层。太古界岩性以片麻岩、麻粒岩、斜长角闪岩等为主；中−上元古界主要以白云质碳酸盐岩为主；中生界主要由陆源碎屑岩及中酸性火山岩组成，与金(银)成矿关系密切[10]。矿区内构造以 NNW 向和 NW 向断裂为主，NNW 向断裂为本区的主要容矿构造，该组断裂在矿区南部呈隐伏状态，NW 向断裂在地表出露规模较大，倾向北东，倾角较陡，断裂带内可见含金硫化物石英脉及热液活动迹象。矿区内岩浆岩主要为燕山期活动的产物，其岩性主要为石英闪长岩和其他脉岩。石英闪长岩属孙家庄闪长岩杂岩体的一部分。脉岩有霏细斑岩、闪长玢岩、变质辉绿(玢)岩等。脉岩多呈北西−北北西(NW-NNW)方向产出、倾向北东，倾角大于 75°或近直立，宽度小于 1 m，个别可达 3 m。

目前，在矿区及近地表共圈定含金石英脉带 12 条，其矿体形态主要呈现脉状或脉带状，分别受 NNW 向和 NW 向两组断裂构造控制，分为 NNW 及 NW 向矿脉。NNW 矿脉分布于 NNW 向压扭性断裂破碎带中，多呈近平行破碎带分布的复脉，具尖灭再现、局部膨大收缩以及分支复合等现象(见图 3)。

矿脉规模较大，长度一般为 600 m，最长可达 1500 m，宽度变化较大，最宽可达 13 m 左右。倾向 80°~87°，倾角 78°~81°。脉体沿走向、倾向产状变化不大，整体呈舒缓波状，脉壁常见斜擦痕。NW 向矿脉受 NW 向区域性断裂的控制，充填特征明显，含金

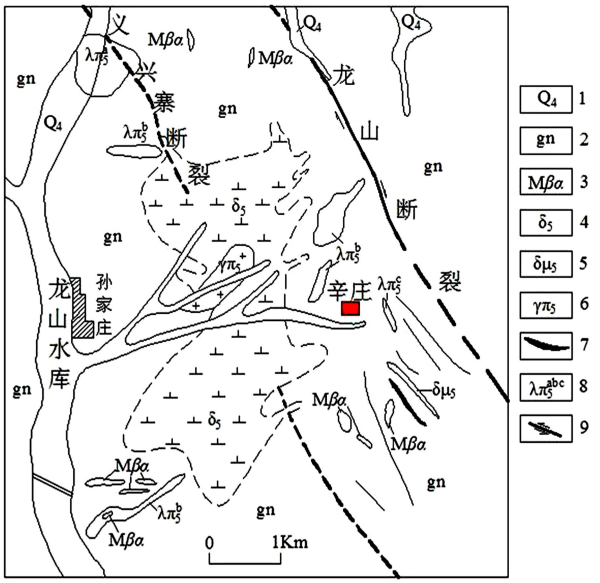


图 2　辛庄金矿地质简图(据文献[6]修改): 1—第四系冲积层；2—五台群片麻岩；3—变辉绿岩；4—石英二长岩；5—闪长玢岩；6—花岗斑岩；7—含金石英脉；8—次长石石英斑岩；9—断裂

Fig. 2　Simplified geological map of Xinzhuang gold deposit (modified from Ref.[6]): 1—Quaternary alluvium; 2—Wutai group gneiss; 3—Metadiabase; 4—Quartz monzonite; 5—Diorite porphyrite; 6—Granite porphyry; 7—Auriferous quartz vein; 8—Secondary feldspar quartz porphyry; 9—Fracture

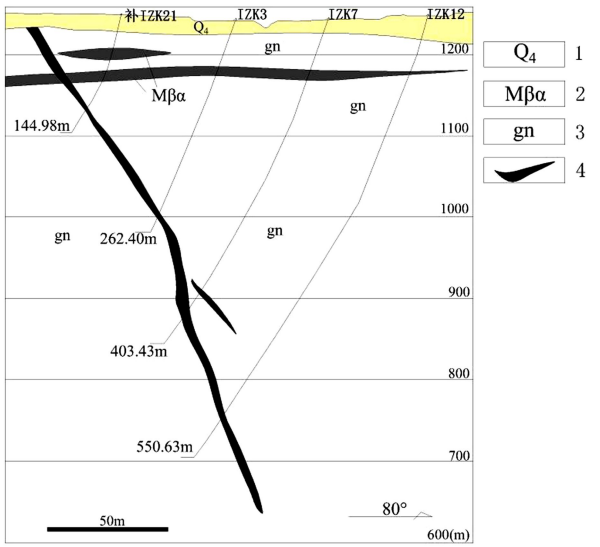


图 3　1-Ⅰ号矿脉 16 号线勘探线剖面图: 1—第四系冲积层；2—变辉绿岩；3—五台群片麻岩；4—矿体

Fig. 3　Prospecting line profile map of 16 line of No.1-Ⅰ vein: 1—Quaternary alluvium; 2—Metadiabase; 3—Wutai group gneiss; 4—Ore body

硫化物石英脉呈不规则状分布。断层破碎带内可见粒径大小不等的构造角砾，呈次圆状、棱角状，排列不具定向性。断层破碎带规模变化较大，长度在 200 m 左右，最长可达 800 m，宽度变化较大，最宽可达 10 m 左右。矿脉倾向 25°~50°，倾角 70°~85°。

原生矿石类型主要包括黄铁矿型矿石、多金属硫化物型矿石以及蚀变岩型矿石。矿石结构主要有自形晶粒状结构、半自形−他形晶粒状结构、充填结构、包含结构、脉状结构以及固溶体分离结构、交代筛状结构、交代溶蚀结构、镶边结构(见图 4)。矿石构造主

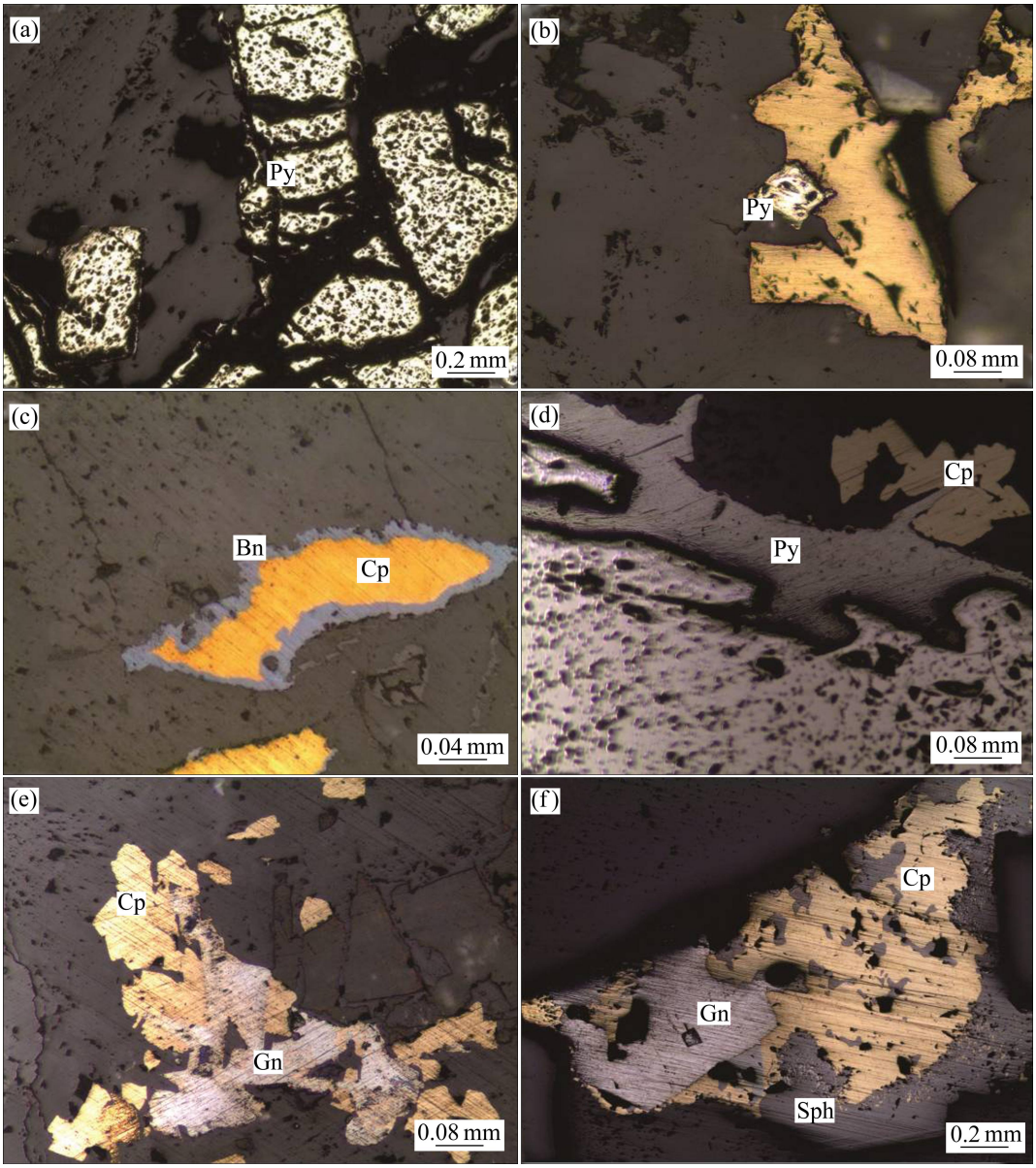


图 4 辛庄金矿床矿床典型矿石结构(Py—黄铁矿；Cp—黄铜矿；Bn—斑铜矿；Gn—方铅矿；Sph—闪锌矿): (a) 自形粒状结构(−)；(b) 黄铜矿沿黄铁矿边缘进行交代，呈镶边结构(−)；(c) 斑铜矿沿黄铜矿边界交代产出，呈镶边结构(−)；(d) 方铅矿沿黄铁矿边缘进行交代，呈交代结构(−)；(e) 方铅矿沿黄铜矿边缘进行交代，呈交代结构(−)；(f) 方铅矿和闪锌矿交代黄铜矿，呈交代结构(−)

Fig. 4 Typical ore textures of Xinzhuang Gold Deposit (Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Bn—Bornite; Gn—Galena; Sph—Sphalerite): (a) Idiomorphic crystal granular texture(−); (b) Chalcopyrite metasomatism occurring along edge of pyrite presented rimmed texture(−); (c) Bornite metasomatism occurring along edge of chalcopyrite presented rimmed texture(−); (d) Galena metasomatism occurring along edge of pyrite presented metasomatic texture (−); (e) Galena metasomatism occurring along edge of chalcopyrite presented metasomatic texture (−); (f) Galena and blende replaced chalcopyrite presented metasomatic texture (−)

要有块状构造、条带状构造、脉状构造、网脉状、细脉浸染状构造。矿石中金属矿物主要为自然金、银金矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿以及微量砷黝铜矿和毒砂等。非金属矿物主要有石英、方解石、高岭石、绢云母、绿帘石、绿泥石等，同时，还有少量的电气石、重晶石、磷灰石、榍石等。

结合野外地质调查，镜下矿物共生组合以及前人研究[8]，将本区的成矿作用划分为 3 个阶段：1) 石英−黄铁矿阶段，主要表现为含金黄铁矿石英脉，矿石矿物以自然金、黄铁矿为主，脉石矿物以石英为主，黄铁矿呈黄白色，具自形−半自形粒状结构，黄铁矿呈他形片状、粒状，在黄铁矿以及脉石矿物的粒间及裂隙中产出；2) 石英−多金属硫化物阶段，主要表现为含金多金属硫化物石英脉，矿石矿物以自然金、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿及方铅矿为主，该阶段金属硫化物充填交代早期生成的黄铁矿，形成交代溶蚀结构、交代残余结构、交代筛状结构以及网脉状结构，脉石矿物以石英为主，其次为绢云母、绿泥石、高岭石等其他矿物生成；3) 碳酸盐阶段，具体表现为含金黄铁矿方解石石英脉，该阶段生成少量石英，金属矿化减弱，形成少量的黄铁矿，呈零星浸染状分布，而方解石及石英呈细脉或网脉状分布于早期的矿石中。矿区围岩蚀变主要有黄铁绢英岩化、硅化、绢云母化、绿泥石化、高岭石化、钾化−赤铁矿化、碳酸盐化等。其中，黄铁绢英岩化、硅化与金矿化关系最为密切。

2　流体包裹体特征

2.1　样品采集及研究方法

本研究样品来自山西辛庄矿区坑道及钻孔等(见表 1)，以石英和方解石等矿物作为研究对象，首先磨制测温片，在显微镜下进行岩相学观察，从中选择部分有代表性的流体包裹体，进行冷冻法及均一法测温。本次测温工作主要在中南大学地球科学与信息物理学院流体包裹体实验室进行，显微测温研究采用英国产 Linkam THMSG600 型地质用冷热台。本研究主要通过显微冷热台测定了水溶液包裹体的冻结温度、部分冰点初始熔化温度、冰点最终熔化温度、完全均一温度以及子矿物融化温度。同时利用 BROWN 等[11]的 FLINCOR 计算机程序，计算出流体的盐度、密度同时采用邵洁涟等[12]提出的公式计算成矿压力。

2.2　流体包裹体类型及特征

辛庄金矿床包裹体以原生包裹体为主，也观察到少量的次生及假次生包裹体。包裹体大小不一，主要处于 2~10 μm 之间，本次研究工作观测到最小原生包裹体为 2 μm，最大的约 13.2 μm(见图 5)。外形多为椭圆状、长条状、不规则，分布无规律，大部分呈孤立状分布。依据流体包裹体在室温下的相态特征，本区原生流体包裹体均为气液两相水溶液包裹体，大部分包裹体的充填度大于 70%。本次测试所有包裹体加热过程中都均一为水溶液相。

2.3　流体包裹体显微测温

对各个阶段石英及方解石中包裹体进行冷冻法及均一法测温，并将测温结果以及利用 FLINCOR 软件计算所得的物理化学参数列于表 2，根据所测样品的均一温度及盐度绘制了温度、盐度直方图(见图 6 和 7)。

从图 6(a)中可以看出，石英−黄铜−黄铁阶段成矿流体温度最高，碳酸盐阶段成矿流体温度最低，即样品 XZ19、D008-4→XZ103→XZ33→XZ27→Y002 流体温度逐渐降低。石英−黄铁矿−黄铜矿阶段成矿温度平均值为 251.6 ℃，石英−多金属硫化物阶段成矿温度平均值为 244.9 ℃，碳酸盐阶段成矿温度平均值为 185.3 ℃。随着成矿作用的进行，成矿温度呈下降趋势，

表 1　辛庄金矿流体包裹体样品采样位置及特征

Table 1　Sampling position and characteristics of samples of fluid inclusions from Xinzhuang gold deposit

样品编号	成矿阶段	采样位置	样品名称	主矿物
XZ19	石英−黄铁矿阶段	1 号脉 645 中段 CM13	含金黄铜黄铁矿石英脉型矿石	石英
XZ33		4 号脉 815 中段	含金黄铁黄铜矿石英脉型矿石	石英
XZ27	石英多金属硫化物阶段	4 号脉 645 中段 SYM	含金斑铜黄铜黄铁矿石英脉型矿石	石英
XZ103		4 号脉 645 中段 SYM	含金矿方铅闪锌石英脉型矿石	石英
D008-4		4 号矿体 645 中段 YM24 线处	含金石英−黄铁矿−方铅矿−闪锌矿矿石	石英
Y002	碳酸盐阶段	2 号矿脉 445 中段 SYM	石英−金属硫化物−方解石	方解石

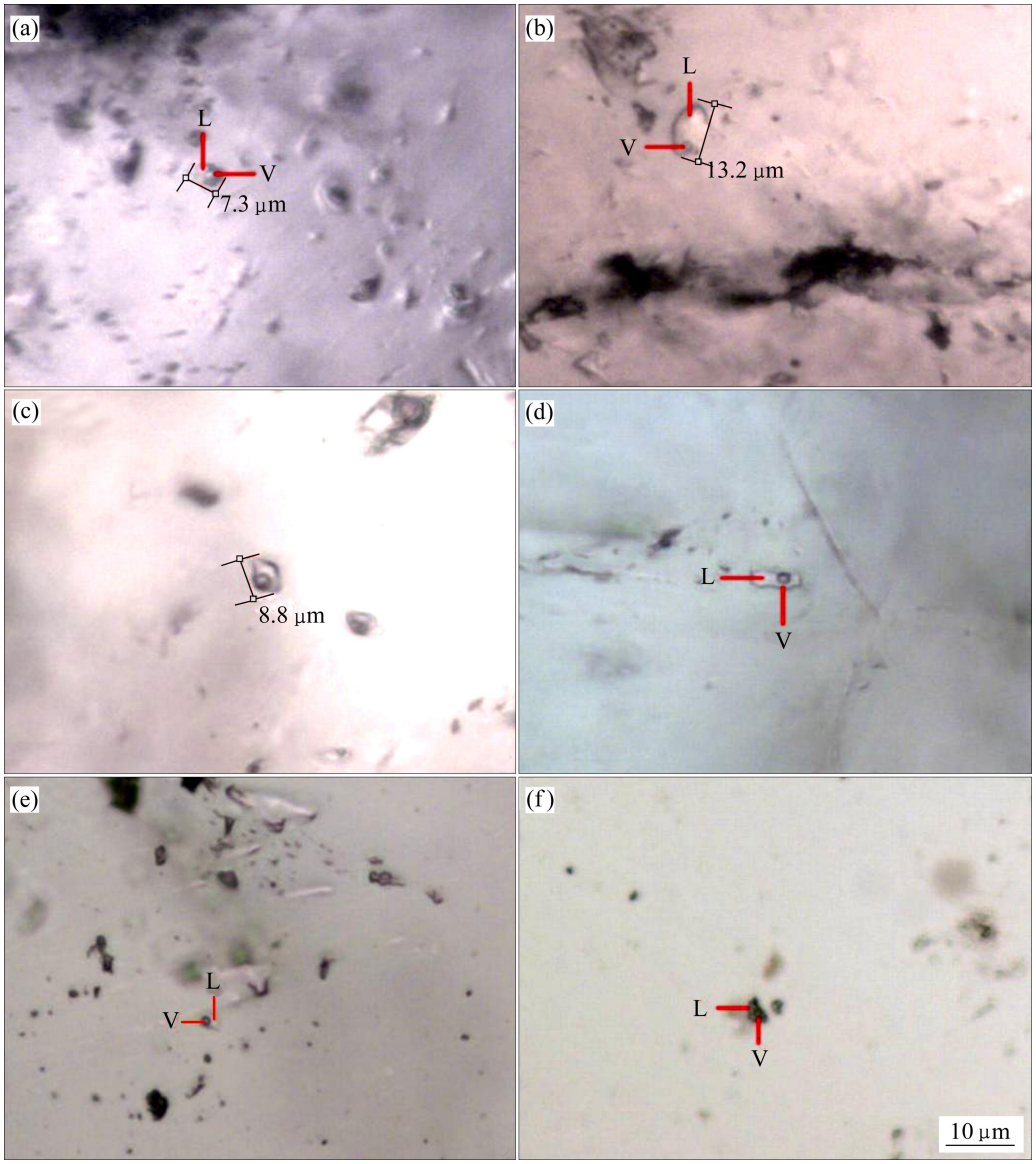


图 5 辛庄金矿床中包裹体的显微照片(V—气相；L—液相): (a) XZ19 石英中的包裹体；(b) XZ33 石英中的包裹体；(c) XZ27 石英中的包裹体；(d) XZ103 石英中的包裹体；(e) D008-4 石英中的包裹体；(f) Y002 方解石中的包裹体

Fig. 5 Microphotos of fluid inclusions from Xinzhuang gold deposit (V—Gaseous phase; L—Liquid phase): (a) Fluid inclusions in quartz of XZ19; (b) Fluid inclusions in quartz of XZ33; (c) Fluid inclusions in quartz of XZ33; (d) Fluid inclusions in quartz of XZ27; (e) Fluid inclusions in quartz of XZ103; (f) Fluid inclusions in calcite of XZ19

但成矿温度到石英−多金属硫化物阶段开始升高，可能是由于后期成矿流体注入所致。在温度直方图(见图 6(a))中可以看出，成矿流体的温度有两个峰值，分别为 320~340 ℃和 220~260 ℃。

石英−黄铁矿−黄铜矿阶段石英中的包裹体，均一温度介于 166.6~360.3℃，主要是在成矿的早期被捕获的，代表了早期成矿阶段流体的活动情况。石英多金属硫化物阶段石英中的包裹体，均一温度介于 176.4~334.2℃，温度与上一成矿阶段相比，先上升后下降，表明了成矿中期有外来流体的加入。方解石中的包裹体均一温度为 152.6~265.2 ℃，代表晚期成矿流体(石英−碳酸盐阶段)的活动情况。总体上看，在整个成矿过程中，从早期到晚期，成矿流体温度呈下降趋势，从深部到浅部，同一成矿阶段的流体温度逐渐降低，表明成矿流体源于深部。

样品 XZ103、D008-4→XZ27、XZ33、XZ27→Y002 流体盐度逐渐降低。在盐度直方图(图 6(b))中可看到两个峰值：6%~10%和 11%~13%(质量分数)。本区域各成矿阶段的石英包裹体的盐度呈现先增长后降低的趋势，可能是由于流体沸腾导致的残留相盐度升高；

表 2　辛庄金矿流体包裹体特征及参数

Table 2　Characteristics and parameters of fluid inclusions from Xinzhuang gold deposit

样品编号	寄主矿物	冻结温度/℃		冰最终融化温度/℃		气液均一温度/℃		盐度/%		密度/(g·cm^{-3})		成矿压力/MPa	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
XZ19	石英	−39.4~−33.2	−36.7	−6.9~−3.2	−4.9	215.7~360.3	285.1	5.3~10.5	7.7	0.66~0.91	0.81	58.7~98.0	77.8
XZ33	石英	−40.8~−31.3	−36.2	−7.8~−2.5	−4.8	166.6~267.5	218.7	4.2~11.6	7.5	0.85~0.96	0.90	45.7~73.3	59.5
XZ27	石英	−36.7~−32.5	−34.8	−8.7~−2.7	−5.6	176.4~244.4	206.5	4.5~12.7	8.7	0.89~0.95	0.93	48.1~67.2	87.4
XZ103	石英	−46.2~31.2	−41.1	−12.9~−4.6	−10.0	216.2~315.8	245.6	7.4~17.2	14.1	0.78~0.98	0.93	60.4~88.1	69.7
D008-4	石英	−53.6~−36.8	−43.6	−13.3~−4.8	−8.9	248.3~334.2	282.7	7.6~17.6	12.7	0.76~0.92	0.88	68.7~93.4	78.4
Y002	方解石	−78.6~−37.6	−53.3	−8.6~−3.2	−6.8	152.6~265.2	185.3	5.3~12.4	8.6	0.93~0.94	0.94	41.0~73.5	50.7

测试单位：中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室，2012。

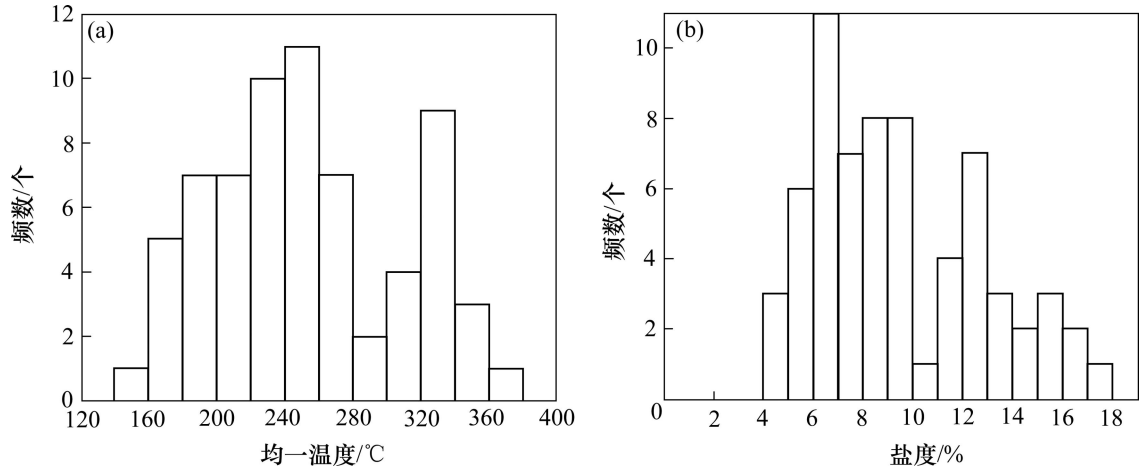


图 6　辛庄金矿床流体包裹体均一温度和盐度统计直方图

Fig. 6　Histogram showing homogenization temperatures(a) and salinities(b) of fluid inclusions from Xinzhuang gold deposit

到多金属硫化物阶段时盐度略有增高，说明后期成矿流体具有中高温、低盐度的特征。同时成矿流体的密度介于 0.66~0.96 g/cm^3，均小于 1 g/cm^3，说明在成矿流体演化过程中，岩浆热液流体起着主导作[13]。

由图 7 可知，各样品点的盐度与均一温度总体呈正相关关系，即随着温度的降低，盐度也随之降低。通过对流体包裹体盐度−温度关系图的分析可以大致推测流体的演化过程：高温低盐度的流体经过一次沸腾后，流体盐度升高，随着成矿作用的进行，大气降水不断混入，流体盐度降低，到多金属硫化物阶段由于后期中高温、低盐度流体的混入温度升幅较大，但盐度略微升高。

2.4　成矿压力和成矿深度

在测试过程中只发现气液两相的包裹体，未见多种类型包裹体共生的现象，因此，不利用包裹体测温直接测定成矿压力。采用经验式(1)[13]计算成矿压力及成矿深度。

$$p_1 = p_0 t_1 / t_0 ,\quad p_0 = 219 + 2620w ,$$

$$t_0 = 374 + 920w ,\quad H_1 = p_1 /(300\times 10^5) \qquad (1)$$

式中：p_1 为成矿压力，10^5 Pa；p_0 为初始压力，10^5 Pa；t_1 为实测温度，℃；t_0 为初始温度，℃；w 为盐度，%；H_1 为成矿深度。

通过计算，石英−黄铜矿−黄铁矿阶段成矿压力介

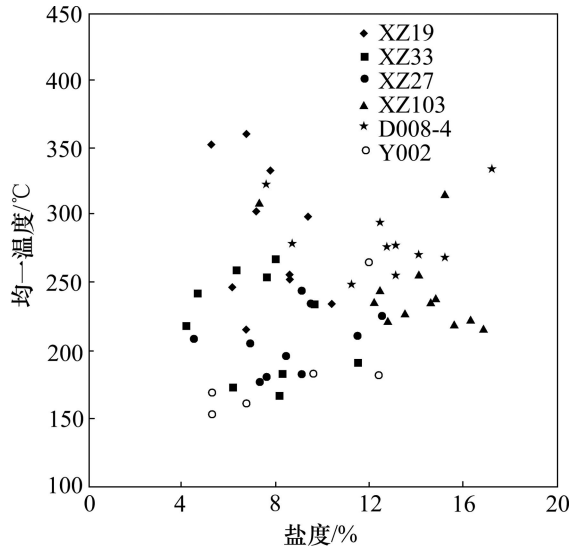


图 7 辛庄金矿床包裹体均一温度与盐度关系图

Fig. 7 Salinity of homogenization temperature plot of fluid inclusions from the Xinzhuang gold deposit

于 45.7~98.0 MPa，平均值为 68.7 MPa，石英−多金属硫化物阶段成矿压介于 48.1~93.4 MPa，平均值为 78.5 MPa，碳酸盐阶段成矿压介于 41.0~73.5 MPa，平均值为 65.5 MPa。石英−黄铜矿−黄铁矿阶段及石英−多金属硫化物阶段为金矿主要形成阶段，其成矿压力介于 45.7~98.0 MPa，而辛庄金矿床的成矿深度应该为 1.52~3.27 km。

2.5 群体包裹体成分分析

包裹体被喻为成矿溶液的原始样品，它可以作为译解成矿作用的密码[14]，其数据被用来确定流体系统演化的特征[15]。通过破碎、分离和选纯成矿过程中与金矿物伴生的石英、黄铁矿及方解石单矿物(纯度＞98%)，对其进行包裹体气液相成分分析以反演成矿溶液性状。由于矿物中的流体包裹体主要为原生包裹体，因而其包裹体流体的液相和气相成分基本反映成矿流体的化学组成。辛庄金矿的包裹体群体成分分析结果见表 3。

表 3 流体包裹体液相成分分析结果

Table 3 Composition of liquid phase in fluid inclusions

原样号	矿物名称	质量分数/10^{-6}										
		F^-	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Li^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
XZ201	石英	0.053	0.314	无	无	1.253	无	0.593	无	1.305	2.141	5.814
XZ102	石英	0.031	0.171	无	无	0.792	无	1.047	无	1.924	1.015	4.209
XZ203	石英	0.081	0.715	无	无	1.407	无	0.924	无	1.513	2.901	6.230
XZ204	石英	0.074	0.548	无	无	1.294	无	0.721	无	1.800	1.924	5.096
XZ103	石英	0.023	0.113	无	无	0.918	无	1.132	无	2.013	1.241	4.398
XZ104	石英	0.059	0.624	无	无	2.137	无	0.821	无	1.785	1.973	5.129
XZ102	黄铁矿	痕	0.347	无	无	5.219	无	0.656	无	1.273	痕	4.599
XZ103	黄铁矿	痕	0.119	无	无	4.893	无	0.769	无	1.433	痕	5.609
D004-1	方解石	0.019	0.152	无	无	1.891	无	1.256	无	0.961	痕	6.723

原样号	矿物名称	质量分数/10^{-6}							
		H_2	O_2	N_2	CH_4	CO_2	C_2H_2	C_2H_6	H_2O
XZ201	石英	2.974	无	痕	34.113	263.742	5.085	7.149	1339
XZ102	石英	1.654	无	痕	23.713	309.582	痕	痕	1110
XZ203	石英	1.538	无	痕	25.135	412.693	3.954	4.192	1489
XZ204	石英	1.247	无	痕	20.635	307.671	3.005	3.192	1692
XZ103	石英	1.986	无	痕	12.879	105.702	痕	痕	1144
XZ104	石英	1.917	无	痕	20.670	336.433	痕	痕	2606
XZ102	黄铁矿	1.195	无	痕	5.064	144.501	痕	无	1257
XZ103	黄铁矿	0.819	无	痕	4.127	172.580	痕	无	1968
D004-1	方解石	0.470	无	痕	18.125	166.526	痕	无	112

测试单位：中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室测试中心，2012。

从表 3 中可以看出，辛庄矿区流体包裹体中液相成分主要为 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-和 F^-。总体上看，本区热液体系相对富含 Ca^{2+}和 Na^+，表明金元素在流体中属于中度富集[16]；阴离子以 SO_4^{2-}、Cl^-、F^-为主，高 SO_4^{2-}含量说明成矿体系中富硫，Cl^-远大于 F^-含量，表明热液体系为一富氯体系，成矿液体中 NO_3^-含量低于检测线，反映热液处于偏碱性的介质环境中[17]。成矿流体的 $w(Na^+)/w(K^+)$可以作为判别流体来源的标志[13]，一般情况下，岩浆热液 $w(Na^+)/w(K^+)$小于 1.00[18]，经计算，本区各成矿阶段石英−黄铜−黄铁阶段以及石英−多金属硫化物阶段成矿流体中的 $w(Na^+)/w(K^+)$介于 0.40~0.61，平均值为 0.51，均小于 1.00，具岩浆热液特征，说明成矿流体主要来源于岩浆水；碳酸盐阶段成矿流体中的 $w(Na^+)/w(K^+)$=1.31，大于 1.00，说明成矿后期有外来水混入成矿流体，后期为混合水。

包裹体气相成分中以 H_2O 为主，其次为 CO_2、CH_4 和少量的 H_2。C_2H_2 和 C_2H_6 在样品 XZ201、XZ203 和 XZ204 中含量相对较高，而在其他样品中含量低于检测线。相对于石英，黄铁矿中 CO_2、H_2 和 CH_4 含量较低，而方解石中 H_2O 含量明显较低。

3　氢氧同位素特征

热液成矿流体水的来源不同[19]，且具体矿床应有其主要来源，而氢氧同位素用于推断热液流体来源及路径被证明是极有用的[20]。石英氧同位素采用常规 BrF_5 法制备，氢同位素则使用真空热爆裂法和锌还原法提取，结果用 MAT251EM 质谱计测定。本次测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成，其中，氧同位素测试精度为±0. 2‰，氢同位素精度为±2‰，测试结果列于表 4。

表 4 中 δD 为石英中包裹体直接测定的水值，$\delta^{18}O_w$是根据 CLAYTON 等[20]有关石英−水体系中氧同位素分馏方程：$1000\ln\alpha_{q-w}=3.38\times10^{-6}T^{-2}-3.4$ 以及对应成矿阶段的包裹体均一温度计算而来。由表 4 可见，石英的 $\delta^{18}O_w$ 值介于 0.02×10^{-3}~6.84×10^{-3} 之间，与 SHEPPARD[21]界定的岩浆水(5.5×10^{-3}~9.5×10^{-3})有较大偏离。在 δD−$\delta^{18}O_w$ 图解中(见图 8[22])中，样品的投影点都位于岩浆水与大气降水之间，靠近岩浆水，但有向大气降水线的“漂移”趋势，表明成矿流体在成矿晚期阶段可能与大气水发生了混合。因此，本区氢氧同位素组成具有大气降水与深部岩浆流体混合特点，反映在成矿晚阶段成矿流体来源的复杂性。

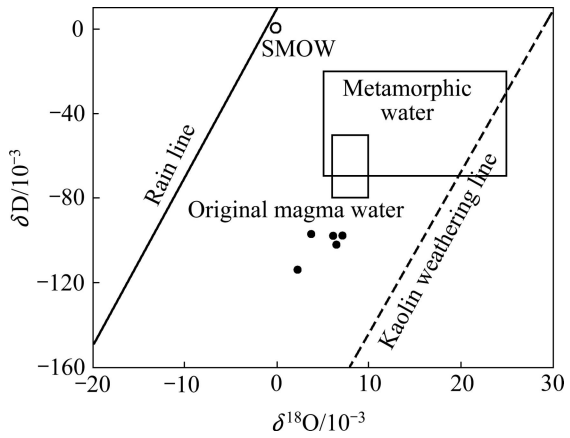


图 8　辛庄金矿床石英氢氧同位素图解(据文献[22]修改)

Fig. 8　Hydrogen and oxygen isotope diagram of Xinzhuang gold deposit (modified from Ref.[22])

4　成矿过程

本区经历了吕梁期以及燕山期等多期构造运动，原始高温高压成矿流体遭受构造活动，特别是断裂构

表 4　辛庄金矿床氢氧同位素特征

Table 4　Composition of Hydrogen and oxygen isotope of Xinzhuang gold deposit

样品编号	测试矿物	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$/‰	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$/‰	$\delta^{18}O_w$/‰	均一温度/℃	成矿阶段
XZ102	石英	−103.6	15.1	6.24	251.9	石英−黄铁矿阶段
XZ203	石英	−97.6	15.7	6.84	251.9	石英−黄铁矿阶段
XZ204	石英	−98.5	15.2	6.01	244.9	石英多金属硫化物阶段
XZ103	石英	−109.4	14.7	5.51	244.9	石英多金属硫化物阶段
XZ104	石英	−98.3	12.7	0.02	185.3	碳酸盐阶段

测试单位：核工业北京地质研究院分析测试中心，2012。

造活动，使压力骤然释放，而形成流体的减压沸腾作用，致使成矿流体中二氧化碳相分离。液相成分 $Na^+/K^+<1$，说明成矿流体中富含 K^+，表明成矿流体具有岩浆特征；本区阴离子 SO_4^{2-} 含量较高，导致 SO_4^{2-} 含量较高的原因可能是由于早期高温岩浆水混入了硫酸盐型热卤水所引起的。本区成矿流体气相成分富含 CO_2，本区成矿流体气相成分富含 CO_2，KERRICH 等[23]认为 CO_2 可能起到与 Au 络合的作用，PHILLIPS 等[24]认为 Au 的有效搬运离不开 H_2S 和 CO_2，其中 H_2S 主要是与 Au 形成金硫络合物，CO_2 则在金的运移过程中起着至关重要的作用。

本区成矿过程大致可分为如下 3 个阶段，第一阶段：成矿流体具有高温、中等盐度、富含 CO_2 的特征，随着成矿作用的进行，成矿流体在断裂了裂隙内运移的过程中与围岩发生热能的传递，随着温度的降低，成矿物质开始在断裂内沉淀，主要以石英和黄铁矿为主；第二阶段：该阶段成矿温度下降，但盐度具有先升高后降低的趋势，可能是由于流体沸腾所致，该阶段 CO_2 的挥发、逸失，产生流体的不混溶现象，导致成矿元素在有利的部位卸载并富集成矿，此阶段以生成石英、大量的金属硫化物为主；第三阶段：随着成矿过程的进行，成矿流体的温度、盐度进一步降低，外界流体混入成分显著增加，金属矿物络合程度较低，以生成大量方解石为主，次有少量的金属硫化物。由此可见，第一、二阶段是本区最主要的成矿阶段，第三阶段只是对前期矿物的富集起到了一定的叠加作用。

5 矿床成因

综合矿床地质特征和流体包裹体特征，辛庄金矿具有如下基本特征：

1) 矿体形态以含金硫化物石英脉的形式为主，且严格受 NNW 向次级断裂控制产出，与围岩有明显界限；

2) 本区主成矿阶段(石英−黄铜矿−黄铁矿阶段和石英−硫化物阶段)以及其所形成的主要矿物组合(石英−黄铜矿−黄铁矿；石英−多金属硫化物)和典型结构构造(自形粒状结构、半自形−他形粒状结构、裂隙充填结构、包含结构、交代溶蚀结构、脉状交叉以及固溶体分离结构；块状、条带状、网脉状、梳状构造)充分显示了热液成矿的特征。

3) 主要围岩蚀变为钾长石化(赤铁矿化)—硅化、黄铁绢云岩化—高岭石化组合及绿泥石化、碳酸盐化，属于热液活动的结果，显现了岩浆热液成矿流体从早期到晚期，从高温到低温的演化规律，反映了矿床的热液成因。

4) 成矿流体属 H_2O-CO_2-Na^+-Cl^--SO_4^{2-} 体系，含少量 CH_4、N_2、H_2S 等；成矿流体温度有两个温度峰值：320~340 ℃和 220~260 ℃，成矿压力范围为 45.7~98.0 MPa，成矿深度为 1.52~3.27 km，属于典型的中温浅成热液矿床，且随着时间推移，成矿流体的温度和压力逐渐降低。

5) 矿区内石英脉的 H、O 同位素特征以及流体包裹体特征可知，本区成矿与燕山期岩浆侵入活动关系密切，岩浆活动带来了大量的成矿物质、成矿流体以及热能，为矿床的形成提供了物质基础和热动力，是矿床形成的决定性因素。

综合以上分析可以看出，辛庄金矿床的形成与燕山期中酸性岩浆的侵位有密切的成因联系，岩浆活动为本区矿体的形成带来了大量的成矿物质，各级断裂为矿体的定位提供了有利的空间，具有明显的充填交代特征，其成因为与燕山期岩浆活动有关的热液型金矿床。

6 结论

1) 辛庄金矿床中流体包裹体主要以气液两相包裹体为主，本次测试的包裹体都属于 NaCl-H_2O 体系，未见含 CO_2 的包裹体。本区流体包裹体均一温度可见两个峰值：320~340 ℃和 220~260 ℃；成矿流体的盐度可以分为 6%~10%和 11%~13%(质量分数)两个区间。成矿流体的密度介于 0.66~0.96 g/cm^3，均小于 1 g/cm^3，属于中高温低盐度流体。

2) 本区流体包裹体气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主，并含有一定量的 CH_4 以及极少量的 C_2H_2、H_2 和 C_2H_6；液相成分主要有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+、Cl^-、SO_4^{2-}，成矿流体来源于岩浆水，后期有外来水的加入。成矿流体组合类型为 H_2O−CO_2−Na^+−Cl^-−SO_4^{2-} 型。

3) 流体包裹体及氢氧同位素研究表明，与本区金矿化有关的成矿溶液主要是一种中高温、低盐度、富含 CO_2 的流体，该流体主要来源岩浆水，但是后期有外来水的加入。

4) 辛庄金矿是与燕山期岩浆活动有关的热液型金矿床。

REFERENCES

[1] 邵拥军, 李永峰, 张贻舟, 胡荣国. 山西省义兴寨金矿床定位规律及找矿方向[J]. 矿床地质, 2006, 25(S): 479−482.
SHAO Yong-jun, LI Yong-feng, ZHANG Yi-zhou, HU Rong-guo. The locating regularity and prospecting target for Yixingzhai gold deposit, Shanxi Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S): 479−482.

[2] 李成禄. 山西省繁峙县义兴寨石英脉型金矿成因矿物学研究与深部预测[D]. 北京: 中国地质大学，2009: 1−91.
LI Cheng-lu. Genetic mineralogy and depth prospecting prediction of Yixingzhai quartz vein type gold deposit in Fanshi County, Shanxi Province[J]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 1−91.

[3] 李双保, 李俊建. 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, 1997, 20 (2): 1−20.
LI Shuang-bao, LI Jun-jian. Characteristic of metallogenic geochemistry of Yixingzhai gold mine field, Hengshan Mt., Shanxi Province[J]. Progress in Precambrian Research, 1997, 20(2): 1−20.

[4] 叶 荣, 赵伦山, 沈镛立. 山西义兴寨金矿床地球化学研究[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 415−418.
YE Rong, ZHAO Lun-shan, SHEN Yong-li. Geochemistry features of Yixingzhai gold deposit in Shanxi Province[J]. Geoscience, 1999, 13(4): 415−418.

[5] 景淑慧. 山西省繁峙县义兴寨金矿床成矿地质条件及成矿规律的研究[M]. 太原: 山西省地质矿产局, 1985: 1−15.
JING Shu-hui. Study of metallogenic geological conditions and metallogenic regularity of Yixingzhai gold ore deposit in Fansi County, Shanxi Province[M]. Taiyuan: Shanxi Provincial Bureau of Geology and mineral resources, 1985: 1−15.

[6] 景淑慧. 山西省繁峙县义兴寨金矿成矿条件及成矿物质来源讨论[C]// 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集(13). 沈阳: 沈阳地质矿产研究所, 1986: 126−134.
JING Shu-hui. On minerogenetic conditions and ore source of Yixingzhai gold ore deposit in Fansi County, Shanxi Province[C]// Chinese Academy of Geological Sciences, Shenyang Institute of Geology and mineral resources (13). Shenyang: Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, 1986: 126−134.

[7] 赵晓霞, 刘忠法, 张普斌, 刘清泉, 张 宇, 张建国. 山西辛庄金矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4374−4380.
ZHAO Xiao-xia, LIU Zhong-fa, ZHANG Pu-bin, LIU Qing-quan, ZHANG Yu, ZHANG Jian-guo. Geological and geochemical characteristics and cause of Xinzhuang gold deposit, Shanxi Province[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11): 4374−4380.

[8] 郑 镝, 何志军, 刘悟辉, 刘忠法, 刘清泉, 郑明弘, 徐 桃. 义兴寨金矿床地质特征及成矿控制因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(3): 833−838.
ZHENG Di, HE Zhi-jun, LIU Wu-hui, LIU Zhong-fa, LIU Qing-quan, ZHENG Ming-hong, XU Tao. Analysis on geological characteristics and ore-controlling factors of Yixingzhai gold ore deposit[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(3): 833−838.

[9] 赵晓霞, 刘忠法, 戴塔根, 刘清泉, 张 宇. 山西辛庄金矿床成矿模式分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2013, 44(5): 1948−1954.
ZHAO Xiao-xia, LIU Zhong-fa, DAI Ta-gen, LIU Qing-quan, ZHANG Yu. Metallogenic model of Xinzhuan gold deposit, Shanxi Province[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44 (5): 1948−1954.

[10] 周绍芝. 晋东北地区银(金)矿成矿特征及远景浅析[J]. 地质与勘探, 1999, 35(3): 5−8.
ZHOU Shao-zhi. Geology and prospecting of silver (gold) deposits in northeast Shanxi[J]. Geology and Exploration, 1999, 35(3): 5−8.

[11] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data[J]. American Mineralogist, 1989, 74: 1390−1393.

[12] 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, 6(3): 5−8.
SHAO Jie-lian, MEI Jian-ming. On the study of typomorphic characteristics of mineral inclusion in the gold deposits from volcanic terrain in Zhejiang and its genetic and prospecting significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1986, 6(3): 5−8.

[13] 卢焕章, 李秉伦. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 12−46.
LU Huan-zhang, LI Bing-lun. The inclusion geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 12−46.

[14] 何知礼. 包体矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 1−304.
HE Zhi-li. Inclusion mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 1−304.

[15] VAPNIK Y, MOROZ I. Compositions and formation conditions of fluid inclusions in emerald from the Maria deposit (Mozambique)[J]. Mineralogical Magazine, 2002, 66(1): 201−213.

[16] 刘 斌, 沈 昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 45−60.
LIU Bin, SHEN Kun. Fluid inclusion thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 45−60.

[17] 傅晓明, 戴塔根, 息朝庄, 刘 伟, 刘 旭. 青海双朋西金铜矿床的成矿流体特征及流体来源[J]. 地质找矿论丛, 2010,

25(1): 24−29.
FU Xiao-ming, DAI Ta-gen, XI Chao-zhuang, LIU Wei, LIU Xu. Characteristics of ore-forming fluid and genesis of the Shuangpengxi gold-copper deposit in Qinghai province[J]. Contributions to geology and mineral resources research, 2010, 25(1): 24−29.

[18] WHITE D E. Diverse origins of hydrothermal ore fluids[J]. Economic Geology, 1974, 69: 954−973.

[19] DILLES J H, SOLOMON G C, TAYLOR H P, EINAUDI M T. Oxygen and hydrogen isotope characteristics of hydrothermal alteration at the Ann–Mason porphyry copper deposit, Yerington, Nevada[J]. Economic Geology, 1992, 87: 44−63.

[20] CLAYTON R N, O'NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 3057−3067.

[21] SHEPPARD S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1986: 165−183.

[22] TAYLOR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 1974, 69(6): 843−883.

[23] KERRICH R, FYFE W S. The gold-carbonate association: Source of CO_2, and CO_2 fixation reactions in Archean lode deposits[J]. Chemical Geology, 1981, 33: 265−294.

[24] PHILLIPS G N, EVANS K A. Role of CO_2 in the formation of gold deposits[J]. Nature, 2004, 429: 860−863.

(编辑 李艳红)