

胶西北焦家金矿深部成矿流体性质及成矿作用

赵泽霖¹⁾, 李俊建¹⁾, 党智财¹⁾, 付超¹⁾, 唐文龙¹⁾, 郭瑞鹏²⁾, 张文²⁾

1) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 100370; 2) 山东省地质调查院, 济南, 250014

内容提要: 胶东金矿集区因储量和产量巨大, 一直是国内外矿床地质学者研究的热点。区内金矿床自西向东集中分布在招(远)—莱(州)断裂带、栖霞断裂带和牟(平)—乳(山)断裂带内。焦家金矿是位于招(远)—莱(州)断裂带内典型的蚀变岩型金矿, 矿体赋存于焦家主干断裂的破碎蚀变带内。主成矿阶段石英内流体包裹体岩相学观察表明, 焦家金矿主成矿阶段流体包裹体类型为 $H_2O-CO_2 \pm CH_4$ 包裹体、 H_2O 溶液包裹体和富 CO_2 单相或两相包裹体。空间紧密的不同包裹体内含碳相体积差异较大, 但均一温度近似。包裹体均一温度为 $160 \sim 320\text{ }^\circ\text{C}$, 属高中温热液流体, 流体具中低盐度 ($4\% \sim 10\% NaCl_{eq}$)、低密度 ($0.64 \sim 1.10\text{ g/cm}^3$) 的特点。流体包裹体激光拉曼测试常见 CO_2 特征的费米共振双峰, 少量可见 CH_4 特征峰。通过对比焦家及区内不同金矿成矿流体性质, 并结合氢氧、碳及锆钼同位素特征的分析, 认为胶东地区蚀变岩型金矿和石英脉型金矿为古太平洋西向俯冲体制下在壳幔边界处发生强烈壳—幔相互作用下的同一构造—岩浆—流体成矿系统的产物, 矿区构造应力场方向转变、含矿流体的沸腾及广泛的水—岩蚀变反应是胶东金矿的成矿机理。

关键词: 焦家金矿; 流体包裹体; 构造—流体耦合; 成矿机理

胶东地区以巨大的金矿产量和储量享誉内外, 发育我国最大的金矿集中区。目前, 胶东地区深、浅部累计探明金矿资源储量超过 4500 t (宋明春, 2015)。根据区内金矿空间分布规律, 矿集区自西向东依次由招远—莱州、栖霞—蓬莱、牟平—乳山三大成矿带, 成矿带内矿床以北北东分布, 显示矿床可能受区域性高级别断裂控制。经过众多区内矿床及矿体地质、矿床地球化学、岩矿关系及成矿规律等方面的研究, 在矿床地质特征及成矿时代方面基本无争议, 并认为矿集区内矿床具“同时性、多源性、爆发性”显著特征 (毛景文等, 2005), 矿化时代集中于早白垩世 ($120 \pm 10\text{ Ma}$)。矿床成因方面, 前人对区内矿床进行了大量的流体包裹体显微测温、拉曼成分及同位素等方面的研究, 对胶东金矿的成矿流体包裹体类型、物理化学性质、流体成分等方面获得的结果较为一致, 但对矿床成矿物质来源及成矿机制的认识有较大争议, 目前较为流行的认识包括: ① 沂沭断裂控矿说 (李洪奎等, 2017); ② “岩浆核杂岩”隆起—拆离带岩浆后期热液蚀变成矿 (吕古贤等, 2016); ③ 中生代构造体制转折背景下的岩

浆—流体成矿 (毛景文等, 2005; 范宏瑞等, 2005); ④ 碰撞造山成矿作用 (陈衍景等, 2004)。此外对流体包裹体的研究主要集中于流体包裹体期次明显、个体较大、发育较广泛的石英脉型, 如玲珑、三甲、乳山、邓格庄、石城、胡八庄、金岭等金矿 (张祖青等, 2007; 胡芳芳等, 2005, 2007, 2008; 蓝廷广等, 2010; 王力等, 2010; 蔡亚春等, 2011), 而蚀变岩型中仅涉及新城、三山岛、黄埠岭等金矿 (周国发等, 2008; 张渊等, 2009; 陆丽娜等, 2011; 薛琮一, 2011; 姜晓辉等, 2011)。焦家金矿作为蚀变岩型金矿的代表, 在成矿流体的性质等方面具有典型性, 其流体包裹体研究却相对较少。本文对采自焦家金矿石进行流体包裹体进行了显微测温及激光拉曼测试工作, 在查清焦家金矿成矿流体性质、成分的基础上, 结合前人研究结果, 初步分析焦家金矿成矿演化过程。

1 区域地质概况

胶北地体位于华北板块东南缘, 北临渤海湾, 南为胶莱盆地, 西为郯庐断裂沂沭段, 东接黄海。以五

注: 本文为国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项 (编号: 2016YFC0600107、2018YFC0603805)、华北地区区域成矿规律研究与总结课题和中国地质调查局项目 (编号: DD20160044) 的成果。

收稿日期: 2019-06-03; 改回日期: 2019-10-26; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.012

作者简介 赵泽霖, 男, 1991年生, 硕士研究生, 主要从事区域矿产地质调查和研究工作; Email: tishan_yue@163.com。

连—烟台为界,其东为苏鲁超高压带北延部分。焦家金矿位于胶北地体招远—莱州成矿带内(图 1)。

胶北地体区域地层格架自底至顶依次为新太古界胶东群、古元古界荆山群和粉子山群、新元古界蓬莱群及第四系松散堆积物。其中新太古界胶东群经地层清理,仅保留原岩为中基性—中酸性火山碎屑岩和陆源碎屑沉积岩的变质岩,岩性包括斜长角闪岩、二云母变粒岩、角闪黑云变粒岩、角闪变粒岩等。古元古界荆山群和粉子山群为同期异相产物,普遍经历高压高温变质,荆山群原岩为成熟度较高的变泥砂质岩石、钙硅酸岩及灰岩等,粉子山群原岩由中酸性火山碎屑—正常陆源碎屑沉积夹碳酸盐岩建造组成,它们原岩形成年代介于 2.1~1.9 Ga 之间(董春艳等, 2011; 刘平华等, 2011)。新元古界蓬莱群为一套陆源碎屑岩—碳酸盐岩海相沉积岩系,岩性包括千枚岩、板岩、石英岩、大理岩和灰岩等低级变质岩。第四系沉积物广泛分布于河湖、山前盆地、沿海海岸等地段。

胶北侵入岩包括新太古代栖霞 TTT 组合和变

辉长岩、晚侏罗世玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗岩及艾山花岗岩。其中新太古代栖霞 TTT 片麻岩组合包括英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩片麻岩,经历了角闪岩相的变质和韧性剪切的双重改造,形成了如今的灰色片麻岩,定向构造发育,呈条带状构造(刘建辉等, 2012)。该岩石组合与金矿关系密切,黄埠岭、夏甸、灵山沟、马家窑、水旺庄等金矿直接赋存其中。形成时代为新太古代,锆石 U-Pb 年龄集中在 2.5~2.9 Ga(刘建辉等, 2011)。玲珑花岗岩主要为浅肉红色中细粒黑云母二长花岗岩呈“厂”形分布,是胶西北最主要且与金矿关系最密切的侵入岩之一,胶西北多数金矿赋存其中,如三山岛—仓上成矿带的三山岛金矿,焦家—新城成矿带焦家、新城、上庄、河东、河西、大伊各庄、望儿山等金矿,招远—平度成矿带玲珑、九曲、东风、台上、夏甸、谢家沟、灵山沟、大磨曲家等金矿。玲珑花岗岩形成时间为晚侏罗世,年龄介于 150~165 Ma(张娟, 2011),玲珑花岗岩形成于扬子板块与华北板块碰撞导致地壳增厚后松弛阶段而发生的部分熔融(范

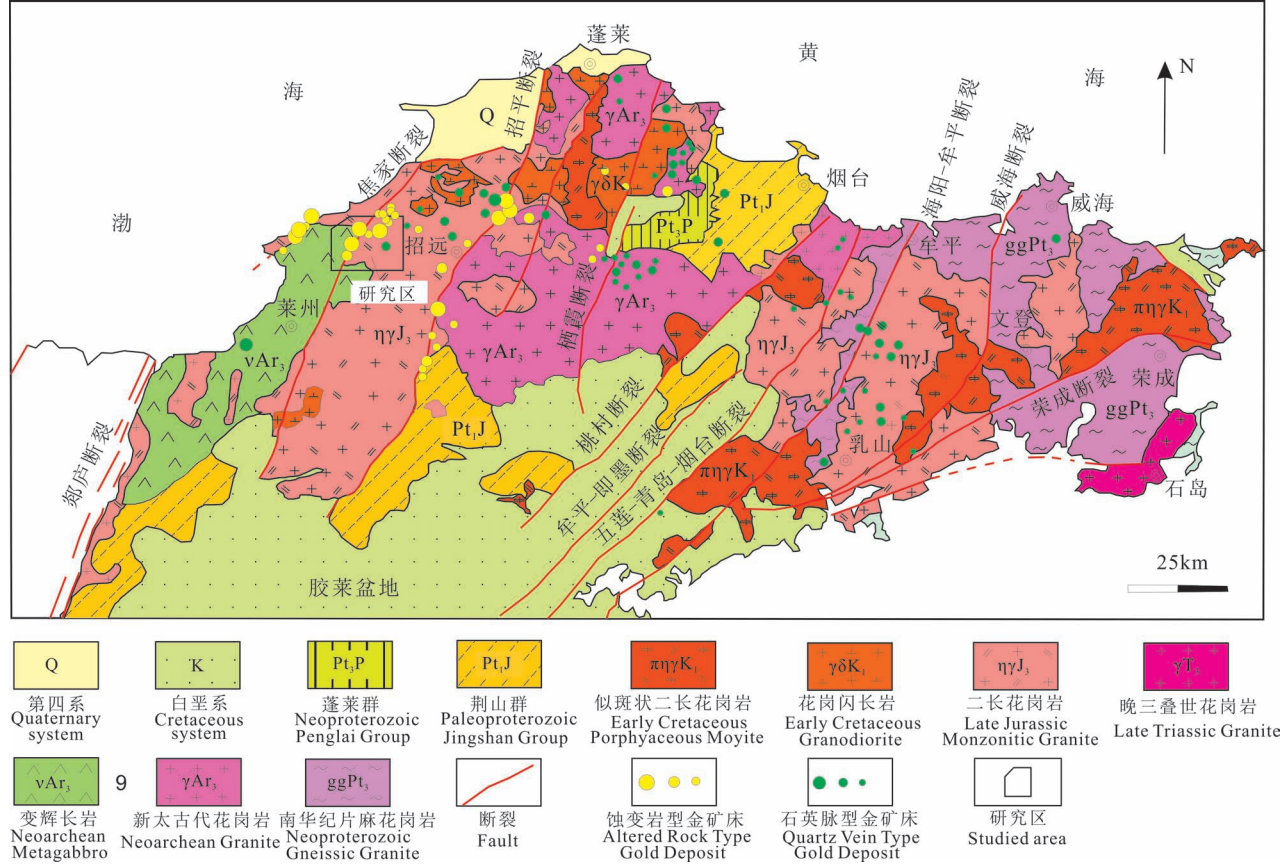


图 1 胶北地体区域地质简图及成矿带分布图(据杨立强等, 2014)

Fig. 1 Simplified regional geological map of Jiaobei terrane, Jiaodong Peninsula, showing the distribution of gold deposit belts(modified from Yang Liqiang et al. , 2014&)

宏瑞等, 2005)。郭家岭花岗岩岩性包括花岗闪长岩、二长花岗岩、石英二长岩和二长闪长岩,也是重要的含矿岩石,与其有密切时空关系的金矿主要包括三山岛—仓上成矿带的仓上、新立金矿,焦家—新城成矿带的新城金矿,招远—平度成矿带的界河金矿以及栖霞市内的庄子、台前等蚀变岩型金矿。郭家岭花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 130~126 Ma (苗来成等, 1998),属早白垩世早期。郭家岭花岗岩受华北板块岩石圈地幔减薄的影响,幔源岩浆的底侵导致加厚基性下地壳部分熔融,形成郭家岭花岗岩原始岩浆(郭敬辉等, 2005)。艾山岩体主要岩性组成为似斑状中粗粒二长花岗岩和少量的花岗闪长岩,SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测年结果为早白垩世晚期(116±2 Ma),受太平洋板块的俯冲与扬子板块和华北板块俯冲碰撞双重作用(杨宽等, 2012)。

胶西北构造活动发育频繁,脆韧性兼有,以脆性断裂控矿作用更为显著。韧性构造主要作用于前寒武纪变质结晶基底之上,具多期性,构造形态为韧性剪切带和褶皱为组成部分。脆性断裂走向以 NNE、NE 为主,形成于印支期和燕山期,作用在前寒武变质基底与中生代花岗岩接触处或岩体内部,控制着胶西北金成矿带的展布方向,EW 向和 NW 向断裂零星夹杂在上述断裂之间(庞绪成等, 2005)。

2 矿床地质特征

焦家金矿是招远—莱州成矿带内焦新次级成矿带的组成矿床之一,同在该次级成矿带及附属断裂内部的还有新城、东季、马塘、望儿山、寺庄等金矿。焦家金矿是典型的蚀变岩金矿,赋存在焦家主干断裂内部的破碎蚀变岩带内部。

矿区及外围地层出露较少,主要为新太古代古老变质岩及中生代花岗岩。胶东群仅以残片状包体产在新太古代古老变质岩内,岩性为二云斜长变粒岩,钻孔控制其在焦家断裂上盘产出,厚度约 30 m。新太古代古老变质岩原岩为辉长岩,经过角闪岩相变质为斜长角闪岩或角闪石岩,二者呈互层或夹层关系。变辉长岩中角闪石多保存辉石的外形,晶体内部可见细小(约 50~100 μm)辉石残晶。中生代花岗岩与成矿关系密切,主要为晚侏罗世玲珑花岗岩和早白垩世郭家岭花岗岩,位于焦新断裂下盘,岩性多蚀变,内含矿体。

矿区内控矿构造为北北东向焦新主断裂及次级望儿山、河西断裂及更次级的侯家支断裂和鲍李断裂。主断裂长约 6500 m,宽 70~250 m,走向 10°~

30°,倾向北西,浅部倾角约 40°,−800 m 标高以下倾角变为 16°~30°。控矿构造具多期活动特点,断层面形态对矿体形态控制明显。

焦家金矿由 I 号、II 号及 III 号矿体群组成, I 号矿体赋存于黄铁绢英岩内,与主断面平行,走向 10°~40°,北西倾角 40°左右,矿体长数百米到 1100 m 不等,厚 1.5~5.5 m 不等。II 号矿体在 I 号矿体之下,赋存在黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩内,产状与 I 号矿体类似,走向长 150~500 m,厚 1~20 m。112 线、128 线、136 线及 152 线等勘探线内诸多钻孔控制着 I 号及 II 号矿体的不同标高,是本文样品的主要采集对象(图 2)。III 号矿体群形成较晚,以透镜状赋存于主断面下的黄铁绢英岩化花岗岩或钾化花岗岩内,受密集张扭性裂隙控制,单个矿体小,数量众多,倾角约 70°~90°,长 50~250 m,厚 1~4 m。

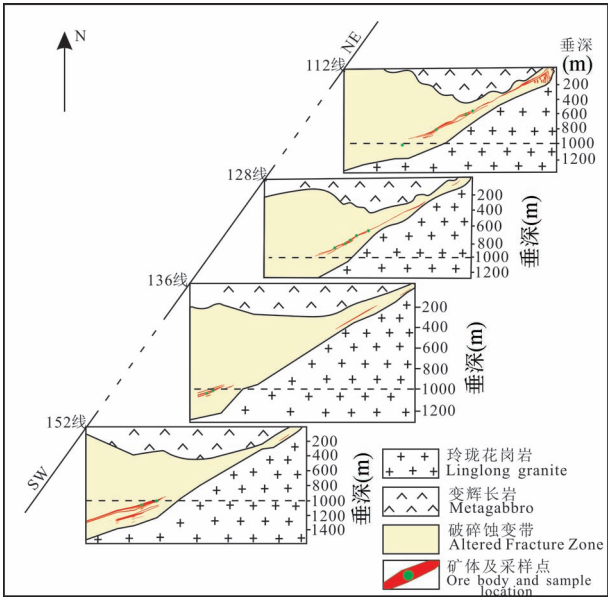


图 2 胶西北焦家矿床 112 线、128 线、136 线及 152 线勘探线剖面图

Fig. 2 Profilemap showing the relative position of prospecting line 112, 128, 136 and 152 and sample locations in Jiaojia gold deposit, Jiaodong Peninsula

矿石类型主要为黄铁绢英岩型、石英—黄铁矿或石英—多金属硫化物型矿石,金属矿物主为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,脉石矿物主为石英、斜长石、钾长石、绢云母、碳酸盐、高岭石和绿泥石等。矿石结构具自形、半自形粒状结构、压碎结构、包含结构、交代残余结构、交代假像结构、填隙结构、乳滴结构和文象结构等。矿石构造为浸染状、细脉浸染

状、脉状、网脉状和交错脉状结构。金主要有自然金、银金矿,其赋存状态以裂隙金为主,其次是晶隙金、包体金。矿体围岩蚀变强烈,自主断面到两侧围岩,蚀变作用和破碎程度由强到弱,依次为黄铁绢英岩带、黄铁绢英岩化碎裂岩带、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带、黄铁绢英岩化花岗岩带、钾化(钠化)花岗岩带、黑云母花岗岩带。

根据矿物组合、结构构造及脉体的切穿关系,焦家金矿成矿作用可分为四个阶段:(Ⅰ)黄铁矿—石英阶段:石英为脉状,呈乳白色,黄铁矿多以粗大自形立方体颗粒与石英共生。该阶段黄铁矿含金低,矿化弱。(Ⅱ)石英—黄铁矿阶段:主要成矿阶段之一,石英与黄铁矿呈充填脉状、网脉状、细脉浸染状,发育在黄铁绢英岩或蚀变碎裂岩的裂隙中。(Ⅲ)石英—多金属硫化物阶段:该阶段石英—多金属硫化物呈脉状、细脉浸染状或网脉状,发育在黄铁绢英岩或蚀变碎裂岩的裂隙,或充填在早期黄铁矿裂隙内,矿化的主要阶段之一。(Ⅳ)碳酸盐阶段:标志着矿化的结束,该阶段热液温度较低,主要发育碳酸盐化蚀变。

3 样品采集及测试方法

本文样品采集于焦家金矿深部(标高-500 m 以下)不同标高,样品类型为黄铁绢英岩型矿石,共计 14 件(表 1)。经过室内详细的矿相学观察发现,黄铁绢英岩型矿石样品矿化较好,矿石结构特征具细脉状、网脉状、浸染状。可见黄铁矿及多金属硫化物产于细小石英脉内,偶见主成矿阶段石英—多金属硫化物穿插切割石英—黄铁矿脉。随后圈定磨制出代表主成矿阶段的石英细脉切片,制成厚度为 0.3 mm 的双面剖光薄片共 31 片,然后在显微镜下详细观察石英—黄铁矿及石英—多金属硫化物细脉内的流体包裹体大小、形状、相态、气液比,从中选择具有代表性、数目较多、个体较大的原生包裹体进行包裹体激光拉曼气态成分测试和冷热台显微温度测试。

包裹体测温工作在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的流体实验室完成。显微测温所用仪器为英国产 Linkam THMS600 型冷热台,可测温度范围为-196~600 ℃。测试精度:大于 400 ℃为±2 ℃,在 25~400 ℃为±1 ℃,在-196~25 ℃为±0.1 ℃。测试过程中,远离相变温度升温速率设置为 10~30 ℃/min,在相变点附近(固态 CO₂ 初融、络合物溶解、冰点温度和均一温度等)升温速率降为 1 ℃/min,以避免包裹

体相态的亚稳定习性带来的相变温度的不准确。

表 1 胶东焦家金矿流体包裹体样品采样深度信息表
Table 1 The height of fluid inclusion samples in Jiaojia gold deposit, Jiaodong Peninsula

样品号	岩性	取样位置
112ZK610YP1	蚀变岩型矿石	631m, 112 线
112ZK622YP1	蚀变岩型矿石	750 m, 112 线
112ZK603YP1	蚀变岩型矿石	846 m, 112 线
112ZK653YP2	蚀变岩型矿石	1055 m, 112 线
128ZK634YP1	蚀变岩型矿石	653 m, 128 线
128ZK633YP1	蚀变岩型矿石	706 m, 128 线
128ZK634YP2	蚀变岩型矿石	752 m, 128 线
128ZK634YP3	蚀变岩型矿石	785 m, 128 线
128ZK635YP2	蚀变岩型矿石	825 m, 128 线
128ZK636YP1	蚀变岩型矿石	890 m, 128 线
136ZK630YP1	蚀变岩型矿石	1012 m, 136 线
136ZK631YP1	蚀变岩型矿石	1040 m, 136 线
152ZK619YP1	蚀变岩型矿石	1000 m, 152 线
152ZK621YP1	蚀变岩型矿石	1056 m, 152 线

包裹体激光拉曼测试在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的拉曼实验室完成,所用仪器为英国产 Renishaw System-2000 显微共焦激光拉曼光谱仪,Ar⁺激发激光波长 514.53 nm,输出功率 20 mW,激光束斑最小直径 1 μm,光谱分辨率 1~2 cm⁻¹。首先在显微镜中找到待测包裹体,一般要求包裹体气相体积较大(大于 2 μm),并调节十字丝对准气泡。每次进行激光测试前需对包裹体拍照,并编号以对应测试结果。测试积分时间为 120 s,收集频谱范围为约 430~4500 cm⁻¹。

4 流体包裹体研究

4.1 岩相学

镜下包裹体片样品矿石结构明显,可见石英与黄铁矿、黄铜矿等金属矿物共生,局部被方解石细脉切穿,表明样品采自石英黄铁矿或石英—多金属硫化物主成矿阶段。文中进行观察、测温及激光拉曼测试的流体包裹体来自与黄铁矿共生的石英内部,呈星点状分布,局部线状分布,它们与寄主石英具有相同的长轴方向,表明包裹体在石英结晶过程中捕获,系主成矿阶段流体。

根据室温及冷冻回温过程下包裹体相态组成及变化,焦家金矿深部矿体流体包裹体包括三种类型,即 H₂O—CO₂ 包裹体、H₂O 溶液包裹体和富 CO₂ 单相或两相包裹体。H₂O—CO₂ 包裹体是焦家金矿主

成矿阶段主要类型,室温下呈两相或三相(H_2O 液相+ CO_2 液相 $\pm\text{CO}_2$ 或 CH_4 气相),该类包裹体 CO_2 体积($V_{\text{CO}_2}+\text{L}_{\text{CO}_2}$)变化较大,可分为富 CO_2 三相包裹体和 CO_2 两相包裹体。富 CO_2 三相包裹体的 CO_2 体积($V_{\text{CO}_2}+\text{L}_{\text{CO}_2}$)约 40%~80%,其中部结构杂乱、颜色较暗者或含 CH_4 ,并经激光拉曼测试出现 CH_4 峰,其个体较大,最高达 15 μm ,形状为负晶形、多边形和不规则(图 3 a—h); CO_2 两相包裹体的 CO_2 体积($V_{\text{CO}_2}+\text{L}_{\text{CO}_2}$)约占 5%~30%,大小多为 4~8 μm ,呈椭圆形、三角形、四边形等。 H_2O 溶液包裹体在镜下与 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4$ 包裹体共生,或独立出现。室温下为两相($V_{\text{H}_2\text{O}}+\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$),气液比常较小(约 5%~30%),气液相界限清楚,液相清澈明亮,气相

跳动,界限为细的黑圆圈。包裹体形状多呈鱼形、椭圆形、三角形等,最大长度约 4~8 μm 之间(图 3 i—l)。富 CO_2 单相或两相包裹体产出数量较少、个体较小(多小于 5 μm),单相或两相,由 $\text{L}_{\text{CO}_2}\pm\text{V}_{\text{CO}_2}$ 组成,气液比为 10%~50%。气相 CO_2 颜色较暗,中心有亮点,与液相界限粗(图 3 m—p)。该类包裹体在胶东矿集区内较为少见,除本研究可见外,仅在三山岛金矿见有发育(姜晓辉等, 2011)。

4.2 显微测温结果

本文对焦家矿床主成矿阶段流体包裹体测温工作包括 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4$ 包裹体 118 个, H_2O 溶液包裹体 13 个和富 CO_2 单相或两相包裹体 7 个,显微测温结果见表 2。

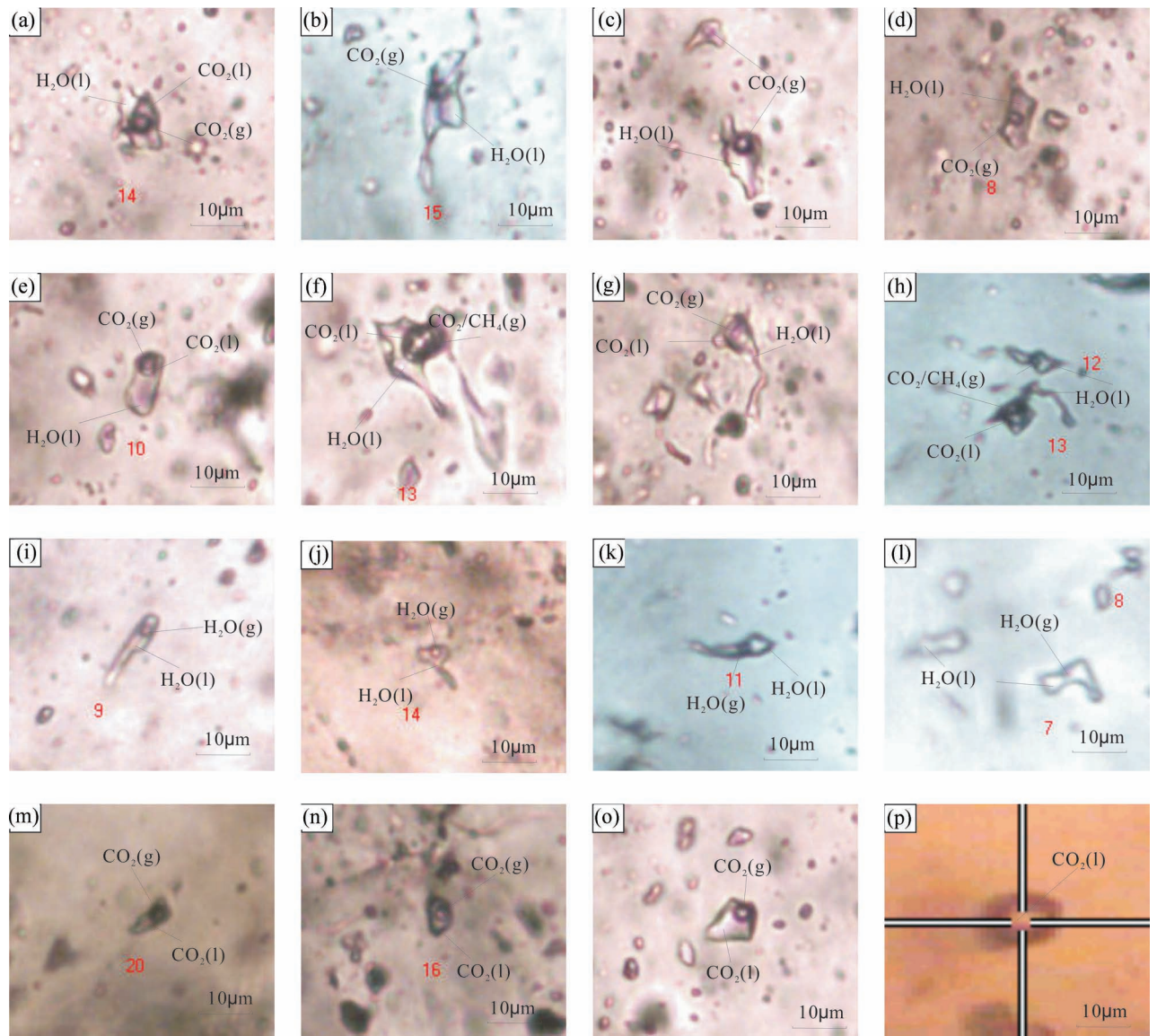


图 3 胶东焦家矿床主成矿阶段流体包裹体类型照片

Fig. 3 Photomicrographs of fluid inclusions in Jiaojia gold deposit, Jiaodong Peninsula

H₂O—CO₂±CH₄ 包裹体常温下为两相或三相, 冷冻至 -110 ℃ 呈单一固态, 多数包裹体回温至 -56.6 ℃ 出现固态初熔, 少数三相包裹体固相初熔温度为 -62.8 ℃, 低于纯 CO₂ 三相点温度为 -56.6 ℃, 说明包裹体中含有 CH₄ 等其他气体。部分包裹体固态冰完全融化温度介于 -0.1~-7.6 ℃, 平均 -3.72 ℃。CO₂ 相较多者气态 CO₂ 与水分子形成笼合物, 其溶解温度为 4.0~9.5 ℃。继续回温, 含碳相发生均一, 温度为 15~30 ℃ (部分均一温度)。持续加热, 包裹体发生完全均一, 温度介于 70~390 ℃ 之间, 主要为 185~360 ℃。

H₂O 溶液包裹体冷冻回温过程中相态变化简单, 第一个相变为固态冰的融化, 13 个包裹体冰点温度为 -0.4 ℃~-6.6 ℃。下一个相变为气液完全均一, 完全均一温度变化于 110 ℃~330 ℃, 平均为 186 ℃ (表 2), 均一相态为液相。

富 CO₂ 单相或两相包裹体冷冻回温过程观察到一例包裹体 CO₂ 初熔温度为 -57.6 ℃, 接近实验

条件下纯 CO₂ 三相点温度 (-56.6 ℃), 表明包裹体气相成分中为纯 CO₂, 不含其它气相物质。继续回温加热, 该类包裹体气液相均一温度为 8~28 ℃, 平均为 21.1 ℃ ($n=7$, 表 2), 均一至气相。

4.3 激光拉曼分析

对焦家金矿主成矿流体包裹体气相进行激光拉曼分析 (图 4), 从典型包裹体激光拉曼频谱位移图来看, 多数形态呈现一定程度的右翘现象, 系包裹体片中环氧树脂未被清洗干净。尽管如此, 在受环氧树脂影响较小、拉曼频移小于 4000 cm⁻¹ 的范围内检测到液态 H₂O 的包络峰 (3310~3610 cm⁻¹ 之间) 和 CO₂ 的费米共振双峰 (1285 cm⁻¹ 及 1388 cm⁻¹), 少量包裹体中检测到了 CH₄ 的特征峰 (2911 cm⁻¹)。焦家矿床 112 线至 152 线勘探剖面的 -650 m~-1120 m 各标高内均检测到 CO₂ 的存在, 其中 -820 m 标高内的 128ZK635YP1 样品 CO₂ 含量尤为丰富。此外, 在 -706 m、-820 m、-1012 m 三个标高内样品检测到 CH₄ 的存在, 这也同含 CO₂ 两相或三相包裹

表 2 胶东矿集区典型矿床成矿流体参数特征

Table 2 Diagram showing the parameters of ore forming fluid in typical deposits of Jiaodong ore cluster

成矿阶段	矿床	包裹体类型	t_{m,CO_2} (℃)	$t_{m,ice}$ (℃)	$t_{m,calth}$ (℃)	t_{h,CO_2} (℃)	$t_{h,tot}$ (℃)
成矿早期	新城	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 H ₂ O)	-57.4~-56.6	-6.6~-4.3	4.7~9.6	20.3~30.7	310~380
	三山岛	H ₂ O—CO ₂ 两相或三相包裹体	-61.2~-56.6		4.2~12.5	8.2~25.8	259~416
	乳山	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 CO ₂)	-56.7~-56.6		4.0~7.9	7.5~25.4, 28.1	350~369, 403
	乳山	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 H ₂ O)	-58.2~-57.0		5.3~8.5	26.2~30.9	258~311
	乳山	H ₂ O 溶液包裹体					212~274
	邓各庄	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 ($V_{co_2}<55\%$)	-56.9~-56.6		5.8~8.7	15.6~27.5	254~365
	石城	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 CO ₂)	-57.4~-56.6		6.3~8.1	31.0~31.2	256~360
主成矿期	新城	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 CO ₂)	-57~-56.6	-3.6~-1	5.1~9.9	24.5~60.9	240~315
	新城	H ₂ O 溶液包裹体					209~311
	三山岛	H ₂ O—CO ₂ 两相或三相包裹体	-63.1~-56.6		3.8~12.8	17.2~31	191~321
	三山岛	单相富 CO ₂ 包裹体	-63~-56.6	-6.7~-0.2			183~272
	三山岛	H ₂ O 溶液包裹体					185~360
	焦家	H ₂ O—CO ₂ 两相或三相包裹体	-62.8~-56.6		4.0~9.5	15~30	110~330
	焦家	H ₂ O 溶液包裹体	-56.6	-0.4~-6.6			
	焦家	单相富 CO ₂ 包裹体	-57.6~-56.6		6.5~8.5	21.1~28	206~273
	乳山	H ₂ O—CO ₂ 包裹体 (富 H ₂ O)	-58.1~-56.6		3.6~8.6	25.3~30.9	183~274
	乳山	H ₂ O 溶液包裹体		-8.3~-0.7			195~317
	邓各庄	H ₂ O—CO ₂ ±CH ₄ 包裹体	-62.4~-56.8		4.3~9.0	0.2~29.3	168~270
	石城	H ₂ O 溶液包裹体					223~263
	石城	含 CO ₂ 的 H ₂ O—CO ₂ 包裹体	-56.8~-56.6	-6.8~-2.7	4.4~7.3	30.8~31.3	
成矿晚期	新城	H ₂ O 溶液包裹体		-2.1~-1			147~170
	三山岛	H ₂ O 溶液包裹体		-6.1~-0.4			112~231
	乳山	H ₂ O 溶液包裹体		-2.8~-0.1			96~188
	邓各庄	H ₂ O 溶液包裹体		-5.5~-0.9			156~219
	石城	H ₂ O 溶液包裹体		-4.8~-0.2			123~178

注:表中新城、三山岛、乳山、邓各庄、石城金矿流体包裹体数据分别来自陆丽娜等(2011)、姜晓辉等(2011)、胡芳芳等(2005)、胡芳芳等(2007)、蓝廷广等(2010)。焦家金矿流体包裹体数据来自本文。

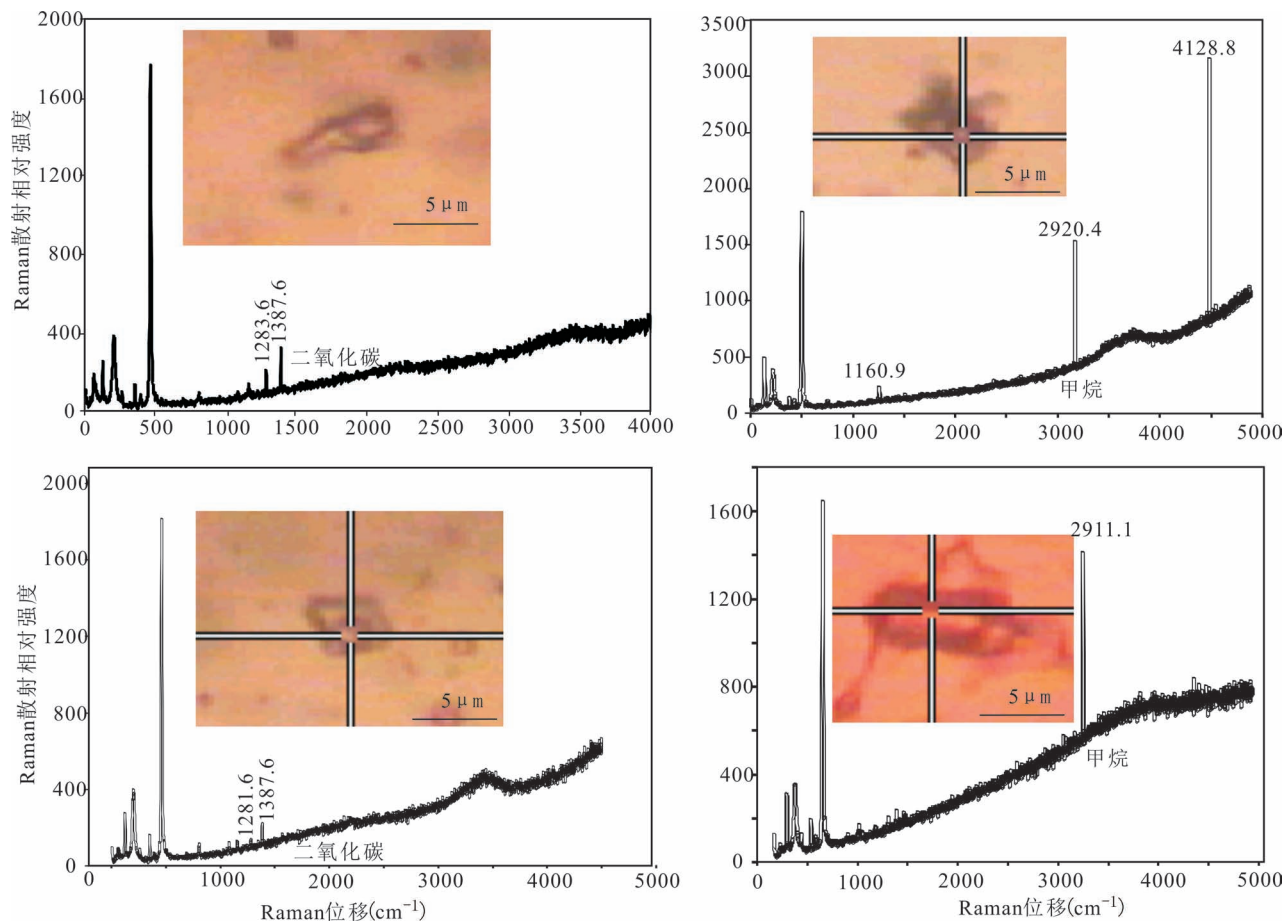


图 4 胶东焦家矿床主成矿阶段代表性包裹体激光拉曼频谱位移图

Fig. 4 Laser Raman spectra of the typical fluid inclusions in Jiaojia gold deposit, Jiaodong Peninsula

体 CO₂ 初熔温度(−62.8 ℃)低于纯 CO₂ 三相点温度(−57.6 ℃)的测温结果一致。以上结果表明焦家金矿成矿流体体系主要为 H₂O—NaCl—CO₂ 体系,同时含 CH₄。

前人对焦家金矿包裹体液相成分进行了检测,结果表明流体离子成分主要为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄^{2−}、F[−]、Cl[−];在不同成矿阶段阳离子成分呈规律变化:早成矿阶段到晚阶段,K⁺含量由高→低→高变化,而 Na⁺含量呈相反趋势。这可能与成矿早期发育大量钾化对 K⁺消耗的结果(王中亮等, 2014)。

5 讨论

5.1 成矿流体性质

焦家金矿流体包裹体激光拉曼测试显示,主成矿阶段含矿流体富含 CO₂,少量见 CH₄ 气体发育。显微测温中固态 CO₂ 的初融温度小于纯 CO₂ 的初融温度(−56.6 ℃),也证实包裹体气态中含有 CH₄

等其他气体成分,说明焦家金矿主成矿阶段流体属于 H₂O—NaCl—CO₂±CH₄ 流体成分体系。表 2 总结了胶东地区乳山、三甲、邓各庄等石英脉型金矿以及三山岛、新城等蚀变岩型金矿各成矿阶段流体包裹体类型组合特征。综合分析可见,胶东地区不同成因类型金矿床各成矿阶段发育的包裹体类型具有一定的相似性。成矿早期以 CO₂ 含量较低的 H₂O—CO₂ 两相或三相包裹体为主,少量发育 H₂O 溶液包裹体;主成矿阶段以发育 H₂O—CO₂ 两相或三相包裹体和 H₂O 溶液包裹体共生为特征,偶可见发育富 CO₂ 单相或两相包裹体;成矿晚期以发育 H₂O 溶液包裹体为特征。

焦家金矿主成矿阶段各类包裹体均一温度主要介于 200~360 ℃,其中 H₂O—CO₂ 的三相包裹体均一温度最高(平均温度为 292.6 ℃),H₂O—CO₂ 两相包裹体次之(平均温度为 224.5 ℃),H₂O 溶液两相包裹体温度最低(平均温度为 186.6 ℃,不排除包含次生包裹体)。综合胶东地区典型金矿床成矿

早期、主成矿期及成矿晚期流体包裹体测温结果(表 2),成矿前期流体包裹体均一温度多在 250~380 ℃ 之间,为中高温热液,主成矿阶段流体包裹体均一温度多集中于 180~330 ℃,为中温热液,成矿晚期流体包裹体温度较低,多集中在 110~200 ℃ 之间,为中低温热液。胶东矿集区内多个矿床均发现流体“沸腾”现象(胡芳芳等, 2008; 蓝廷广等, 2010),本文对焦家金矿包裹体岩相学观察中也发现 H₂O 溶液及富气相 H₂O—CO₂ 包裹体呈共生现象,它们的显微测温结果显示具有类似的均一温度,均一温度多集中在 300~330 ℃ 狭窄范围内。此外,在达到均一温度时, H₂O 溶液包裹体均一至液相,而富气相 H₂O—CO₂ 包裹体则多均一至气相。以上表明焦家深部成矿流体可能发生“沸腾”或流体不混溶作用(卢焕章,2011)。

焦家金矿包裹体液相成分分析结果表明流体离子成分主要为 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、F⁻、Cl⁻。实验表明,金矿床的含矿热液中金以以金硫络合物 [Au(HS)]⁰、[HAu(HS)₂]⁰、[Au(HS)]⁻¹ 或金氯络合物 [AuCl]²⁻、[AuCl]⁰、[AuCl(OH)]⁻¹ 等形式

进行运移(Hayashi et al. , 1991)。富 CO₂ 可以有效调节流体 pH 值,对金硫络合物或金氯络合物的稳定起了关键作用。

根据包裹体不同显微测温数据,可以获得各类包裹体的盐度和密度参数,进而反映成矿期间古流体的物理状态。对于有 CO₂ 水合物形成的 H₂O—CO₂±CH₄ 包裹体,利用 Collins(1979)经验方程

$$W/(100\%NaCl_{eq})=15.52022-1.02342T/K-0.05286(T/K)^2 \tag{1}$$

T 为水合物溶解温度,计算得包裹体盐度 (*W*_(NaCl)) 为 1.03~10.58 % NaCl_{eq};对于有冰粒形成的 H₂O—CO₂±CH₄ 包裹体,其盐度可通过 Hall 等(1998)经验公式计算:

$$W/(100\%NaCl_{eq})=1.78T/K-0.0442(T/K)^2+0.000557(T/K)^3 \tag{2}$$

T 为水冰点下降温度值,计算盐度为 0.18~11.22 % NaCl_{eq}。均一温度结果可通过 MacFlinco 程序(Browm and Hagemann,1995)对流体包裹体内流体含碳相密度和包裹体总密度进行估算,分别为 0.64~0.82 g/cm³ 和 0.82~0.97 g/cm³,为低密度流体。

H₂O 溶液包裹体盐度计算采用 Bodnar(1993)公式,用 HokieFlinco 程序,包裹体盐度变化于 0.18%~11.22% NaCl_{eq},主要分布在 4%~10% NaCl_{eq},平均 6.92% NaCl_{eq},属于中低盐度流体。根据 Bodnar(1983)和 Atkinson(2002)提供的盐度—密度公式,利用 HokieFlinco 程序计算该类包裹体密度介于 0.64~1.10 g/cm³,平均为 0.92 g/cm³。结果表明焦家金矿的成矿流体具有中低盐度、低密度的特点。

5.2 成矿流体来源

本文系统搜集并分析了胶东主要金矿含金石英、流体包裹体中稳定同位素或载金矿物、方解石中放射性同位素组成特征。胶东主要金矿床成矿流体氢氧同位素组成较为相似,在 δD_{H₂O}—δ¹⁸O_{H₂O} 图解中主要位于岩浆水内或岩

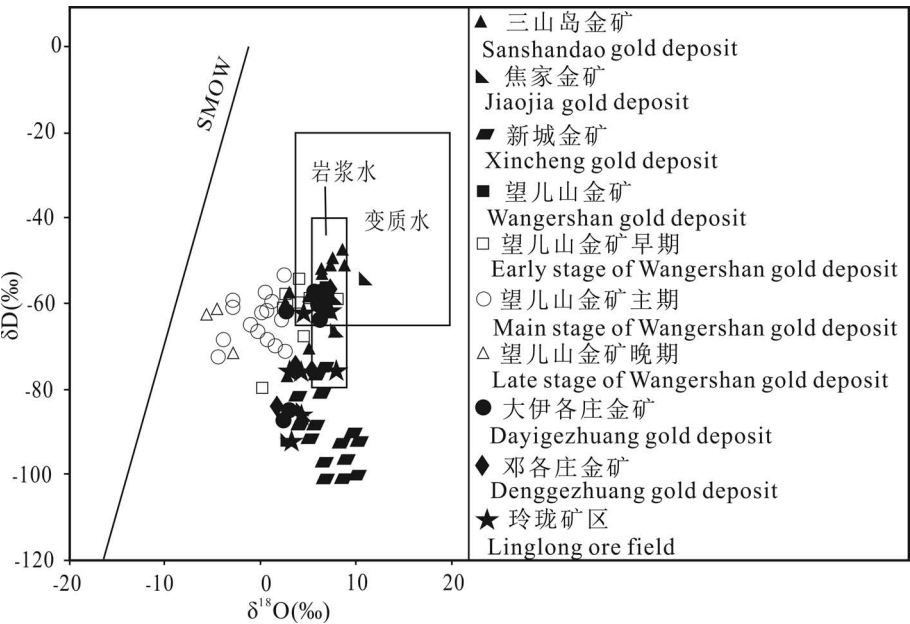


图 5 胶东典型金矿成矿流体 δD_{H₂O}—δ¹⁸O_{H₂O} 图解(焦家、大伊格庄、邓各庄和玲珑矿区均来自毛景文等(2005);三山岛、新城、望儿山数据分别来自姜晓辉等(2011)、陆丽娜等(2011)、郭林楠等(2014))

Fig. 5 Diagram showing δD_{H₂O} vs. δ¹⁸O_{H₂O} of ore-forming fluid for typical gold deposits in Jiaodong Peninsula(Jiaojia, Dayigezhuang, Denggezhuang and Linglong ore field data from Mao Jingwen et al. , 2005& Sanshandao, Xincheng, Wangershan deposits data from Jiang Xiaohui et al. , 2005& Lu Lina et al. , 2011& Guo Linnan et al. , 2014& respectively)

浆水下偏向大气水位置,且从主成矿期到成矿晚期逐渐由靠近岩浆水的区域向大气水方向演化(图 5),表明矿区成矿流体来源具统一性,且成矿早期主要为岩浆水,随着成矿作用的进行有大气降水的加入。碳酸盐矿物碳同位素在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SWOM}}$ 图解中均位于地幔多相体系或原生碳酸盐右侧偏上位置(图 6),而具壳幔混源特征,并与赋矿围岩发生交代作用。胶东典型金矿 I_{sr} (初始锶,下同)与 ε_{Nd} 特征如图 7。焦家及玲珑金矿介于壳源玲珑花岗岩(张娟,2011)与壳幔混源郭家岭花岗岩(郭敬辉等,2005)及脉岩之间,指示二者成矿热液具类似起源,且与壳幔混源流体相关。

5.3 成矿机理

前人认为胶东矿集区内蚀变岩型和石英脉型形成于同一构造应力场中,是同一构造—岩浆—流体成矿系统的产物(李厚民等,2002;翟明国等,2005),本文在焦家金矿流体包裹体类型、均一温度及激光拉曼成分测试基础上,结合前人有关其他蚀变岩型金矿和石英脉岩金矿碳、氢、氧稳定同位素及铀钍放射性同位素特征对比分析,认为两类金矿具类似的成矿热液性质和成矿物理化学条件,它们可能来源于地壳深部统一的含矿流体体系,这种成矿流体被认为是基性幔源岩浆在地壳浅部脱水作用形成的岩浆水(周新华等,2002;范宏瑞等,2005)或幔源岩浆去气带入二氧化碳和金并与地壳浅部流体混合而成(赫英等,2001;毛景文等,2002),而不直接来源于花岗岩期后热液,区内早白垩世晚期郭家岭花岗质岩浆可能与上述成矿流体均为地球内部强烈的壳—幔相互作用的产物(赵泽霖,2016)。这两种金成矿类型的差异在于容矿构造条件(构造样式、规模、强度)和成矿作用方式不同(石玉臣等,2005),在一级断裂构造挤压剪切破碎带或主断裂构造下盘的次级压扭性带,应力状态为压扭性,围岩破碎程度较彻底,发育黄铁绢英岩蚀变带,热液以交代、渗透方式成矿,形成蚀变岩金矿;而在远离主干构造的Ⅱ级及底级别次级断裂裂隙或与主构造为反倾向的低级序的节理裂隙中,应力状态为张性或扭张性,构造破坏程度低,蚀变类型为钾化(红化),热液以充填方式成矿,则形成石英脉型金矿。普遍认为胶东大规模金成矿作用是

华北东部中生代构造体制由东西向构造格局向北北东向构造格局转变的表现形式(翟明国等,2001;陈衍景等,2004,范宏瑞等,2005)。在矿床的微观领域,成矿前构造岩有限应变椭圆体拉伸轴主要集中于 NW—SE 向,指示成矿区构造应力场为北西西向挤压或北东东向拉伸(丁式江等,1998;钱建平等,2011)。在岩浆上隆或区域右行剪切作用下(李厚民等,2002;吕古贤等,2016),区域主成矿阶段应力状态转为张扭性,主应力方向为北西向拉伸(郭涛,2005)。在主断面发生含矿流体与围岩反应,形成蚀变岩型金矿的矿化场所,而在远离主断面蚀变花岗岩内部产生大量张裂隙,形成石英脉型金矿的赋矿空间。

从早期成矿阶段到主成矿阶段由 NW 向挤压到 NW 向拉伸的构造应力转变导致了含矿流体气液相分离,这与本文及区内其他金矿床均发现“沸腾”流体包裹体组合的事实相吻合。研究认为,流体中金的溶解度与氧逸度 $[f(\text{O}_2)]$ 和 pH 值密切相关,偏还原和弱酸性的化学条件有利于金的溶解和稳定搬运(Seward,1973),而流体中 CO_2 、 CH_4 等挥发分逸出,降低了流体 pH 值的自调节能力,导致流体中以金硫络合物 $[\text{Au}(\text{HS})]^0$ 、 $[\text{HAu}(\text{HS})_2]^0$ 、 $[\text{Au}(\text{HS})]^{-1}$ 或金氯络合物 $[\text{AuCl}]^{2-}$ 、 $[\text{AuCl}]^0$ 、 $[\text{AuCl}(\text{OH})]^{-1}$ 等形式进行运移的金处于不稳定状态,促

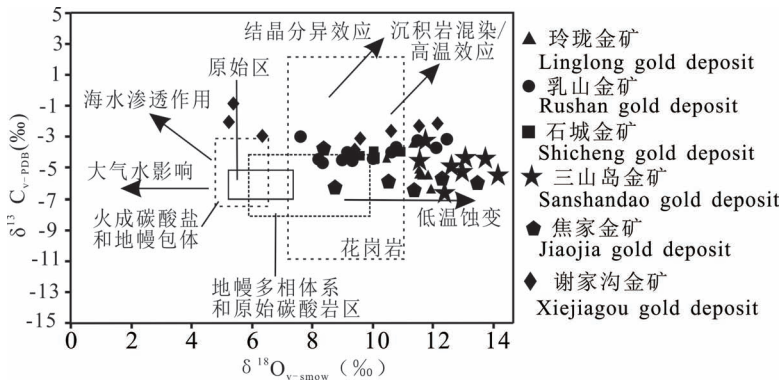


图 6 胶东典型金矿床碳酸盐矿物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SWOM}}$ 图解[底图据孙景贵等,2001。乳山、焦家数据来自刘建明等(2003);玲珑、石城、三山岛、谢家沟数据分别来自毛景文等(2005)、蓝廷广等(2010)、李晓明等(1988)和孙莉(2006)]

Fig. 6 Diagram showing $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SWOM}}$ from carbonated minerals for typical gold deposit in Jiaodong Peninnsula (base map was from Liu Jianming et al., 1997& and Sun Jinggui et al., 2001&. Rushan, Jiaojia gold deposits from Liu Jianming et al., 2003; Linglong, Shicheng, Sanshandao, Xiejiagou data from Mao Jingwen et al., 2005&, Lan Tingguang et al., 2010& and Li Xiaoming et al., 1988&, Sun Li., 2006& respectively)

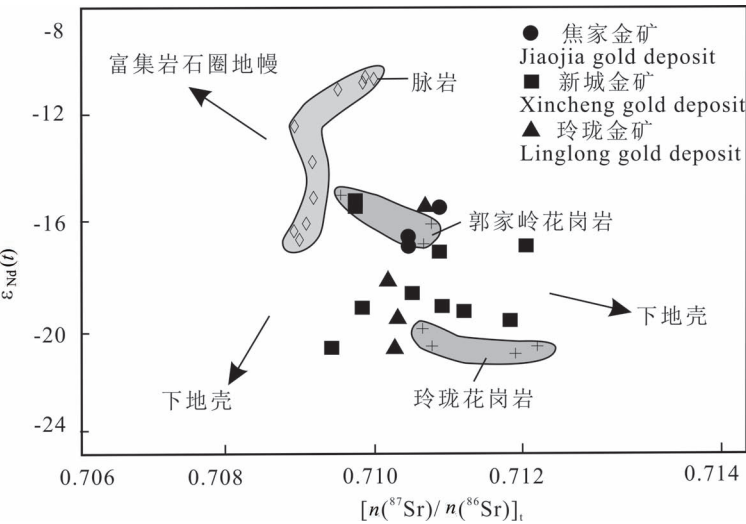


图 7 胶东典型金矿床及岩体 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
[焦家金矿数据来自刘建明等(2003);其余数据来自周新华等(2002)]
Fig. 7 Diagram showing $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_t$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for typical gold deposits and granites from Jiaodong Peninsula (Jiaojia gold deposit data from Liu Jianming et al., 2003&, other data from Zhou Xinhua et al., 2002&)

进金在有利的构造空间内沉淀析出。

此外,与石英脉型充填成矿方式不同的是,蚀变岩型金矿主成矿阶段发育显著的黄铁绢英岩化、硅化、黄铁矿化等围岩蚀变。该蚀变过程消耗流体中大量 $(\text{HS})^-$ 、 Cl^- 、 $(\text{OH})^-$ 阴离子,导致与金形成络合物的 $[\text{Au}(\text{HS})]^0$ 、 $[\text{HAu}(\text{HS})_2]^0$ 、 $[\text{Au}(\text{HS})]^{-1}$ 或 $[\text{AuCl}]^{2-}$ 、 $[\text{AuCl}]^0$ 、 $[\text{AuCl}(\text{OH})]^{-1}$ 离子团的分解,同时金以单质形式沉淀析出。黄铁矿、黄铜矿等多金属矿化等形成铁、铜等多金属硫化物,成为金的载体。因此,焦家金矿主成矿阶段的黄铁绢英岩化蚀变作用一方面使得金硫络合物的溶解度降低,促进金从含金热液中析出,另一方面反应形成的黄铁矿和多金属硫化物为金质提供了载体作用。

综上所述,中生代前后华北东部发生由 NW 向到 NNE 向构造体制的转折,矿区内构造应力场方向随之发生转变,在不同构造部位形成减压扩容的成矿空间,并引发含矿流体的“沸腾”及广泛的水—岩蚀变反应,含矿热液在渗透、交代及充填等成矿方式下,分别在强破碎蚀变内及弱破碎花岗质岩体的裂隙内,形成区内两种主要的蚀变岩型和石英脉型金矿化。构造体制的转变反映区域构造—成矿域的变化。研究认为,包括胶东在内的华北东部于中生代进入滨太平洋构造—成矿域(朱日祥等,2009),认为成矿动力、成矿热液的来源、金的活化萃取及沉

淀,均属古太平洋西向俯冲体制下在壳幔边界处发生强烈壳—幔相互作用下的构造—流体—成矿体系。

6 结论

通过对焦家金矿主成矿黄铁矿—石英脉及多金属硫化物—石英脉矿石样品中典型原生包裹体测温及激光拉曼分析,综合前人研究资料,取得如下认识:

- (1)焦家金矿包裹体类型同胶东众典型矿床类似,发育 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$ 包裹体、 H_2O 溶液包裹体和富 CO_2 单相或两相包裹体,其中富碳相包裹体常与富 H_2O 溶液包裹体空间共生,激光拉曼测试常见 CO_2 特征的费米共振双峰,少量可见 CH_4 特征峰。
- (2)焦家金矿主成矿阶段流体温度为 $160 \sim 320\text{ }^\circ\text{C}$,属高中温热液流体;流体具中低盐度($4\% \sim 10\% \text{NaCl}_{\text{eq}}$)、低密度($0.64 \sim 1.10 \text{ g/cm}^3$)的特点。

(3)胶东地区蚀变岩型和石英脉型金矿是同一构造—岩浆—流体成矿系统的产物,在中生代前后古太平洋西向俯冲作用下,华北东部发生由 NW 向到 NNE 向构造体制转折,剧烈的壳—幔互相作用形成胶东金矿成矿流体,矿区内应力场方向的转变、含矿流体的“沸腾”及广泛的水—岩蚀变反应共同导致流体中金溶解的失稳,含矿热液以渗透、交代及充填等方式,在不同构造部位和容矿空间内成矿。

致谢:野外工作期间得到山东地质调查院领导及地质同行的热情帮助,审稿专家提出了宝贵修改意见,极大提高了论文的学术水平,在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

蔡亚春, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 蓝廷广, 于虎, 柳玉明. 2011. 胶东胡八庄金矿成矿流体, 稳定同位素及成矿时代研究. 岩石学报, 27(5): 1341~1351.

陈衍景, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. 岩石学报, 20(4): 907~922.

丁式江, 王建平. 1998. 胶东望儿山金矿带有限应变分析及其意义. 华东地质学院学报, 21(1): 1~6.

董春艳, 王世进, 刘敦一, 王金光, 劼顽强, 王伟, 宋志勇, 万渝生. 2011. 华北克拉通元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中—基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年.

岩石学报, 27(6): 1699~1706.

范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. 岩石学报, 21(5): 1317~1328.

郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. 岩石学报, 21(4): 1281~1301.

郭林楠, 张潮, 宋宇宙, 陈炳翰, 周铸, 张炳林, 徐晓磊, 王彦玮. 2014. 胶东望儿山金矿床氢—氧同位素地球化学. 岩石学报, 30(9): 2481~2494.

郭涛. 2005. 胶西北金矿区域成矿系统及其构造—流体—矿化研究 [D]. 导师: 翟裕生, 吕古贤. 北京: 中国地质大学 (北京) 博士学位论文: 1~107.

赫英, 毛景文, 王瑞廷. 2001. 慢源岩浆去气形成富二氧化碳含金流体——可能性与现实性. 地学前缘, 8(4): 265~270.

胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 翟明国, 金成伟, 陈绪松. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化. 岩石学报, 21(5): 1329~1338.

胡芳芳, 范宏瑞, 杨奎峰, 沈昆, 翟明国, 金成伟. 2007. 胶东牟平邓格庄金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23(9): 2155~2164.

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. 岩石学报, 24(9): 2037~2044.

姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 蓝廷广, 郑小礼, 金念宪. 2011. 胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因. 岩石学报, 27(5): 1327~1340.

蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 刘玄, 刘振豪, 宋玉波, 于虎. 2010. 胶东石城金矿床成矿流体特征及成矿作用. 岩石学报, 26(5): 1512~1522.

李洪奎, 卜文峰, 崔传源, 耿科, 梁太涛. 2017. 山东胶东矿集区中生代构造事件与金矿成矿作用. 山东国土资源, 33(1): 1~9.

李厚民, 沈远超, 刘铁兵. 2002. 胶东西北部焦家式与玲珑式金矿的成因联系. 矿床地质, 22: 621~624.

李晓明. 1988. 山东三山岛金矿床氧、氢碳稳定同位素的研究及其应用. 地质找矿论丛, 3(3): 62~71.

刘建辉, 刘福来, 丁正江, 刘平华, 王舫, 游君君. 2012. 胶北~2.5 Ga 岩浆热事件的锆石 Hf 同位素特征及其对地壳演化的指示意义. 岩石学报, 28(9): 2697~2704.

刘建辉, 刘福来, 刘平华, 王舫, 丁正江. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆—变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. 岩石学报, 27(4): 943~960.

刘建明, 叶洁, 徐久华, 孙景贵, 沈昆. 2003. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳—氧和铍—钽同位素地球化学研究. 岩石学报, 19(4): 775~784.

刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011. 山东半岛高压麻粒岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义. 地学前缘, 18(2): 33~54.

卢焕章. 2011. 流体不混溶性和流体包裹体. 岩石学报, 27(5): 1253~1261.

陆丽娜, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 郑小礼, 赵海. 2011. 胶西北新城金矿成矿流体与矿床成因. 矿床地质, 30(3): 522~532.

吕古贤, 丁正江, 李秀章, 魏绪峰, 李洪奎, 周明岭, 刘殿治, 温桂军. 2016. 中国东部中生代“岩浆杂岩”隆起—拆离带热液蚀变成矿问题——以胶东金矿区为例. 地质论评, 62(S1): 319~320.

毛景文, 赫英, 丁梯平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据. 矿床地质, 21(2): 121~128.

毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据. 地质学报, 79(6): 839~857.

苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14(2): 198~206.

庞绪成, 顾雪祥, 唐菊兴, 傅邵洪, 吕古贤, 孙之夫, 郑小礼. 2005. 山东焦家金矿深部盲矿体定位预测研究. 成都理工大学学报 (自然科学版), 32(6): 551~555.

钱建平, 陈宏毅, 吴小雷, 王自国, 蒙勇. 2011. 胶东望儿山金矿成矿构造分析和成矿预测. 大地构造与成矿学, 35(2): 221~231.

石玉臣, 刘长春, 杨承海, 王芳, 李爱民. 2005. 胶东地区蚀变岩型与石英脉型金矿的空间分布关系及形成机制. 山东国土资源, 21(8): 19~21.

宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. 地质通报, 34(9): 1758~1771.

孙景贵, 姚凤良. 2011. 胶东中生代中酸性花岗杂岩与壳幔成矿作用. 黄金科学技术, 5(1): 25~29.

孙莉. 2006. 胶东谢家沟金矿床流体包裹体研究. 导师: 王建国. 北京: 中国地质大学. 硕士学位论文: 1~64.

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. 岩石学报, 26(12): 3735~3744.

王中亮, 赵荣新, 张庆, 鲁辉武, 李京濂, 程蔚. 2014. 胶西北高 Ba—Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr—Nd 同位素约束. 岩石学报, 30(9): 2595~2608.

薛琨一. 2011. 胶东新城金矿床成矿流体特征. 导师: 杨立强. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 48~51.

杨宽, 王建平, 林进展, 郑加行, 杨国志, 吉海. 2012. 胶东半岛艾山岩体岩石地球化学特征及成因意义. 地质与勘探, 48(4): 693~703.

杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447~2467.

翟明国, 刘文军, 杨进辉. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用. 中国科学: D 辑, 31(7): 545~552.

翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 隋建立. 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵、置换与拆沉作用. 岩石学报, 21(6): 1509~1526.

张娟. 2011. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究 [D]. 导师: 郑永飞. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文: 1~168.

张渊, 孙景贵, 王可勇, 邱殿明. 2008. 胶东西北部黄埠岭金矿床流体包裹体特征及其在成矿预测中的意义. 世界地质, 27(3): 245~251.

张祖青, 赖勇, 陈衍景. 2007. 山东玲珑金矿流体包裹体地球化学特征. 岩石学报, 23(9): 2207~2216.

赵泽霖. 2016. 山东焦家金矿成矿作用与深部预测. 导师: 李俊建. 北京: 中国地质科学院. 硕士学位论文: 1~113.

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. 现代地质, 22(1): 24~33.

周新华, 杨进辉, 张连昌. 2002. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. 中国科学 (D 辑), 32: 11~20.

朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报 (中文版), 54(14): 1950~1961.

Atkinson J R. 2002. A Model for the PTX Properties of H₂O—NaCl. Blacksburg: Unpublished M. Sc. Thesis of Virginia Tech.: 1~133.

Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids. Econ. Geol., 78: 535~542.

Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O. NaCl solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 683~684.

Brown P E and Hagenann S G. 1995. MacFlinCor and its application to

- fluids in Archean lode-gold deposits. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59:3943~3952.
- Cai Yachun, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, Lan Tingguang, Yu Hu and Liu Yuming. 2011&. Ore-forming fluids, stable isotope and mineralizing age of the Hubazhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5):1341~1351.
- Chen Yanjing, Lai Yong and Li Chao. 2004&. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4):907~922.
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, 74:1435~1444.
- Ding Shijiang, Wang Jianping. 1998&. Analysis of limited defined strain of Wangershan gold deposit, Jiaodong and its significance. *Journal of East China Institute of Geology*, 21(1):1~6.
- Dong Chunyan, Wang Shijin, Liu Dunyi, Wang Jinguang, Xie Wanqiang, Wang Wei, Song Zhiyong and Wan Yusheng. 2010&. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate—basic intrusive rocks in eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1699~1706.
- Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Jinhui, Shen Kun and Zhai Mingguo. 2005&. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5):1317~1328.
- Guan Kang, Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Huang Jiazhan. 1998&. Study on SHRIMP zircon age of Guojialing granite, Jiaodong Peninsula. *Geosciences*, 33(3):318~328.
- Guo Jinghui, Chen Fukun, Zhang Xiaoman, Siebel W and Zhai Mingguo. 2005&. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1281~1301.
- Guo Linnan, Zhang Chao, Song Yuzhou, Chen Binghan, Zhou Zhu, Xu Xiaolei, Wang Yanwei. 2014&. H—O isotopic geochemistry of the Wangershan gold deposit, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9):2481~2494.
- Guo Tao. 2005&. Study on regional metallogenic system and its structural fluid mineralization in Northwest Jiaodong gold deposit [D]. Supervisor: Zhai Yusheng, Lü Guxian. Beijing: Doctor dissertation of Chinese university of geology(Beijing):1~107.
- Hayashi K, Ohmoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl- and H₂S-bearing aqueous solutions at 250 ~ 350 °C. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 55(8):2111~2126.
- Hayashi K, Ohmoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl- and H₂S-bearing aqueous solutions at 250 ~ 350 °C. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 55(8):2111~2126.
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl—KCl—H₂O solutions. *Econ. Geol.*, 83:197~202.
- He Ying, Mao Jingwen, Wang Ruiting, Zhang Zhanjun. 2001&. Carbon dioxide-rich and gold-bearing fluids degassed from mantle-derived magma—reality and possibility. *Earth Science Frontiers*, 8(4):265~270.
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Shen Kun, Zhai Mingguo, Jin Chengwei and Chen Xusong. 2005&. Nature and evolution of ore-forming fluids in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5):1329~1338.
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Yang Kuifeng, Shen Kun, Zhai Mingguo and Jin Chengwei. 2007&. Fluid inclusions in the Denggezhuang lode gold deposit at Muping, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2155~2164.
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Yu Hu, Liu Zhenhao, Song Linfu and Jin Chengwei. 2008&. Fluid inclusions in the Sanjia lode gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9):2037~2044.
- Jiang Xiaohui, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifang, Lan Tingguang, Zheng Xiaoli, and Jin Nianxian. 2011&. Comparative studies on fluid inclusion in different depth and ore genesis of the Sanshandao gold deposit Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5):1327~1340.
- Lan Tingguang, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifang, Liu Xian, Liu Zhenhao, Song Yubo and Yu Hu. 2010&. Characteristics of ore forming fluids and ore genesis in the Shicheng gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5):1512~1522.
- Li Hongkui, Bu Wenfeng, Zhuo Chuanyuan, Geng Ke, Liang Taitao. 2017&. Mesozoic tectonic events and mineralization of gold deposits in Jiaodong area in Shandong Province. *Shandong Natural Resource*, 33(1):1~9.
- Li Houmin, Shen Yuanchao, Liu Tiebing. 2002. Genetic relationship between Jiaojia-type and Linglong-type gold deposits in northwestern Jiaodong district, Shandong Province. *Mineral Deposits*, 22:621~624.
- Li Xiaoming. 1998&. Study and application of oxygen, hydrogen and carbon stable isotopes in sanshandao gold deposit, Shandong province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 3(3):62~71.
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Ding Zhengjiang, Liu Pinghua, Wang Fang, You Junjun. 2012&. The zircon Hf isotope characteristics of ~2.5 Ga magmatic event and implication for the crustal evolution in the Jiaobei terrane China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9):2697~2704.
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang and Ding Zhengjiang. 2011&. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the Zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):943~960.
- Liu Jianming, Ye Jie, Xu Jiuhua, Sun Jinggui and Shen Kun. 2003&. C—O and Sr—Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):775~784.
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, Liu Jianhui. 2011&. In-situ U-Pb dating of zircons from high-pressure granulites in Shandong Peninsula, Eastern China and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 18(2):33~54.
- Lu Huanzhang. 2011&. Fluids immiscibility and fluid inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5):1253~1261.
- Lu Lina, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, Zheng Xiaoli, and Zhao Hai. 2011&. Ore-forming fluids and genesis of Xincheng altered rock gold deposit in northwestern Jiaodong Peninsula. *Mineral deposit*, 30(3):522~532.
- Lü Guxian, Li Hongkui, Ding Zhengjiang, Han Fangfa, Li Bohui. 2016&. Hydrothermal alteration metallogenesis in the determination zone of a “magmatic core complex” upheaval—detachment structure, Jiaodong. *Geoscience*, 30(2):247~262.

Mao Jingwen, He Ying, Ding Tiping. 2002&. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) gold district; Evidence of C, O and H isotopes. *Mineral Deposits*, 21(2): 121~128.

Mao Jingwen, Li Houmin, Wang Yitian, Zhang Changqing, Wang Ruiting. 2005&. The relationship between mantle derived fluid and gold ore-formation in the Eastern Shandong Peninsula; Evidences from D—O—C—S isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839~857.

Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Guan Kang, Huang Jiazhan. 1998&. The implication of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the Petrogenesis of the Linglong Granite, East Shangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 198~206.

Pang Xucheng, Gu Xuexiang, Tang Juxing, Fu Shaohong, Lü Guxian, , Sun Zhifu, Zheng Xiaoli. 2005&. Study on deep blind ore body location prediction in Jiaojia gold mine in shandong province. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32(6):551~555.

Qian Jianping, Chen Hongyi, Wu Xiaolei, Wang Ziguo, and Meng Yong. 2011&. Study of ore- forming structure and metallogenic prognosis of the Wangershan gold mine in Jiaodong Peninsula. *Geotectonica et Metallogenia*. 35(2): 221~231.

Seward T M. 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal oresolutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(3): 379~399.

Shi Yuchen, Liu Changchun, Yang Chenghai, Wang Fang, Li Aimin. 2005. Distribution relation and genesis of altered and quartz-vein gold deposits in East Shandong. *Shandong Natral Resource*, 21(8): 19~21.

Song Mingchun. 2015&. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1758~1771.

Sun Jinggui, Yao Fengliang. 2011&. Mesozoic acid granitic complex and crustal slow mineralization in Jiaodong. *Gold Science and Technology*, 5(1): 25~29.

Sun Li. 2006&. Study on the Fluid Inclusions of Xiejiagou Gold Deposit. Supervisor; Wang Jianguo. Beijing: Chinese University of Geosciences(Beijing). Master's Dissertation; 1~64.

Wang Li, Sun Fengyue, Wang Jialiang. 2010&. Geochemical features of ore forming fluids of the Jinling gold deposit, Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3735~3744.

Wang Zhongliang, Zhao Rongxin, Zhang Qing, Lu Huiwu, Li Jinglian and Cheng Wei. 2014&. Magma mixing for the high Ba—Sr Guojialing-type granitoids in northwest Jiaodong Peninsula; Constraints from petrogeochemistry and Sr—Nd isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2595~2608.

Xue Congyi. 2011&. Characteristics of ore- forming fluids of Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. Supervisor; Yang Liqiang. Beijing: Master's degree thesis from Chinese university of geosciences (Beijing): 48~51.

Yang Kuan, Wang Jianping, Lin Jinzhan, Zheng Jiaxing, Yang Guozhi, Ji Hai. 2012&. Petrogeochemical characteristics and genetic significance of the Aishan pluton in the Jiaodong Peninsula. *Geology and Exploration*, 48(4): 693~703.

Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014&. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447~2467.

Zhai Mingguo, Liu wenjun, Yang Jinhui. 2001#. Large scale gold distict and large scale accumulation of gold in Jiaodong Peninsular. *Science China; D Series*, 31(7): 545~552.

Zhai Mingguo, Fan Qicheng, Zhang Hongfu, Sui Jianli. 2005&. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China; Magma underplating, replacement and delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1509~1526.

Zhang Juan. 2011&. Geochemical study of Mesozoic Magmatic Rocks in the Sulu Orogenic Belt. Supervisor; Zheng Yongfei. Hefei. Hefei: Doctor's Dissertation of Chinese University of Science and Technology; 1~168.

Zhang Yuan, Sun Jinggui, Wang Keyong, Qiu Dianming. 2008&. Characteristic of fluid inclusions from Huangbuling gold deposit in northwestern Jiaodong and their significance in metallogenic prognosis. *Global Geology*, 27(3): 245~251.

Zhang Zuqing, Lai Yong and Chen Yanjing. 2007&. Fluid inclusion study of the Linglong gold deposit, Shandong province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2207~2216.

Zhao Zelin. 2016&. Metallogenesis and Prediction of Jiaojia Gold Deposits, Shandong Province. Supervisor; Li Junjian. Beijing: . Master's Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences; 1~113.

Zhou Guofa, Lü Guxian, Deng Jun, Shen Yuke, Guo Tao. 2008&. Study on the fluid inclusions characteristics of the Sanshandao gold deposit, Shandong Province, China, and its geological significance. *Geoscience*, 22(1): 24~33.

Zhou Xinhua, Yang Jinhui, Zhang Lianchang. 2002#. Formation of the super large gold deposits in Jiaodong, and evolution of Mesozoic lithosphere beneath North China Block. *Science in China (Series D)*, 32: 11~20.

Zhu Rixiang, Zheng Tianyu. 2009&. Failure mechanism and Paleoproterozoic plate tectonic system of North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1950~1961.

The characteristics of deep ore-forming fluid and metallogenesis of Jiaojia gold deposit, northwest Jiaodong Peninsula

ZHAO Zelin¹⁾, LI Junjian¹⁾, DANG Zhicai¹⁾, FU Chao¹⁾, TANG Wenlong¹⁾, GUO Ruipeng²⁾, ZHANG Wen²⁾

1) Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin, 100370;
2) Shandong Bureau of Geological Survey, Jinan, 250014

Abstract: Researches of the Jiaodong gold cluster have always been the subjects of discussion among ore geologists, due to the huge reserve and production. Three ore fields distribute along Zhaoyuan—Laizhou fault belt,

Qixia fault belt and Muping—Rushan fault belt. Jiaojia gold deposit situated in Zhaoyuan—Laizhou fault belt is typical of alteration rock type gold deposit, ore bodies of which lie in the crashed alteration belts of the Jiaojia main fault. The paper focused on the fluid inclusions of the main mineralizing stage, and came up with that types of fluid inclusions from main mineralizing stage include two or three phases $H_2O-CO_2\pm CH_4$ type, two phases aqueous type and single or two phases CO_2 -rich type. Volum of carbonate phase between spatially tightly related inclusions diverse notability, but are approximate in the homogenization temperature. The homogenization temperatures, salinities and desinies of fluid inclusions from the main mineralization stage rang from 160 °C to 320 °C, 4% to 10% $NaCl_{eq}$ and 0.64 to 1.10 g/cm³, belonging to high—mediate temperature, mediate—low soolid, low desinity fluid. Laser laman testing of the fluid inclusions shows feimie resonace sprumme of typical of CO_2 , and CH_4 typical sprumme are occasionally. Contrasting the characteristic of ore fluid, H—O, C and Sr—Nd isotope between Jiaojia and other gold deposit types from Jiaodong Peninsula, it is suggested that altered rock type and quartz vein type gold deposits are both products of the same tectonic—magma—fluid mineralization system insult from the interaction between crust and mantle, which taken place under the western subduction of Asian Pacific regime during Early Cretaceous. Convection of structural force field orientation, boiling of ore fluid and wide fluid—rock alteration are the ore forming mechanics of Jiaodong gold deposits.

Keywords: Jiaojia gold deposit, northwest Jiaodong Peninsula (Shandong Peninsula); fuilid inclusions; structure-fluid interconnection; ore forming mechanical

Acknowledgements: This study is supported by the National Key R & D Program of China (Grant Nos. 2016YFC0600107, 2018YFC0603805), research and summarize program of reginal metallogenetic regularity of North China Block and China Geological Survey Project (Grant No. DD20160044)

First author: ZHAO Zelin, male, born in 1991, assistant engineer, engaged in regional geological survey and regional matellogeny; Email: 791026199@qq.com

Manuscript received on: 2019-06-03; Accepted on: 2019-10-26; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.012