

# 焦家金矿成矿流体垂向变化特征及对胶东金成矿过程的启示

胡换龙<sup>1 2 3</sup> 姜晓辉<sup>1 4</sup> 梁改忠<sup>1 2</sup> 杨奎锋<sup>1 2</sup> 范宏瑞<sup>1 2\*</sup>

1.中国科学院 地质与地球物理研究所 矿产资源研究院重点实验室 北京 100029;  
2.中国科学院大学 地球科学学院 北京 100049; 3.中国科学院 地球化学研究所,  
矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081; 4.核工业北京地质研究院 北京 100029

**摘要:** 为探讨焦家金矿成矿流体的时空演化特性,在焦家金矿①号和③号矿体纵深450 m的剖面上采集矿化样品,对不同阶段、不同深度石英脉中流体包裹体进行显微测温以及成矿流体特征垂向对比研究。结果显示,成矿早阶段石英主要捕获H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>型包裹体,其完全均一温度为271~359℃,盐度为6.0%~10.0% NaCl<sub>eqv</sub>, X<sub>CO<sub>2</sub></sub>为0.1~0.15。主成矿阶段石英中捕获大量H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>型、H<sub>2</sub>O型和CO<sub>2</sub>型包裹体,它们的完全均一温度为198~315℃,盐度为6.5%~8.5% NaCl<sub>eqv</sub>。成矿晚阶段石英中只发育H<sub>2</sub>O单相和气流两相包裹体,其完全均一温度为102~188℃,盐度为0.2%~3.8% NaCl<sub>eqv</sub>。研究显示,焦家金矿成矿流体与其他胶东金矿成矿流体特征与演化过程一致,且在纵深450 m剖面上保持不变。与前人研究成果对比发现,胶东金矿具有统一的流体来源,但成矿物质显示出更为复杂的来源,应有源于沉积地层的物质加入。

**关键词:** 流体包裹体;显微测温;垂向对比;焦家金矿;胶东

中图分类号: P618.51 文章编号: 1007-2802(2021)06-1345-12 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.053

## The Vertical Variation Characteristics of Ore-forming Fluids of the Jiaojia Deposit: Implications for Mineralizing Processes of Gold Deposits in the Jiaodong Peninsula

HU Huan-long<sup>1 2 3</sup>, JIANG Xiao-hui<sup>1 4</sup>, LIANG Gai-zhong<sup>1 2</sup>, YANG Kui-feng<sup>1 2</sup>, FAN Hong-rui<sup>1 2\*</sup>

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;  
4. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

**Abstract:** In order to explore the temporal and spatial evolution characteristics of the ore-forming fluid in the Jiaojia gold deposit, samples at various levels with depths of elevations varying from -167 to -600 m were taken from the No. ① and ③ gold orebodies of the Jiaojia deposit. For undertaking the vertical contrast study of ore-forming fluid characteristics, the microthermometric study of fluid inclusions in quartz veins of different ore-stages from samples collected at different depths has been carried out. The results show that early ore-stage quartzs mainly captured H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-type fluid inclusions that had their total homogenization temperatures of 271-359℃, salinities of 6.0%-10.0% NaCl<sub>eqv</sub>, and X<sub>CO<sub>2</sub></sub> values of 0.1-0.15. The main ore-stage quartzs captured a large amounts of H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> type fluid inclusions with their total homogenization temperatures of 198-315℃ and salinities of 6.5%-8.5% NaCl<sub>eqv</sub>. The late stage quartzs only captured H<sub>2</sub>O type fluid inclusions that had the total homogenization temperatures of 102-188℃ and salinities of 0.2%-3.8% NaCl<sub>eqv</sub>. These microthermometric results suggest that the ore-forming fluid of the Jiaojia gold deposit has the consistent characteristics and evolution process with those of other gold deposits in the Jiaodong Peninsula, and the ore-forming fluid characteristics kept stable within the 450 m ranged vertical profile. Combining with results of previous and this studies, it is be-

收稿编号: 2021-075 2021-05-08 收到 2021-05-13 改回

基金项目: 科技部重点研发计划重点专项(2016YFC0600105); 国家自然科学基金项目(41672094, 41772080)

第一作者简介: 胡换龙(1992-), 男, 博士研究生, 研究方向: 成矿流体演化与热力学模拟. E-mail: cughhl@163.com.

\* 通信作者简介: 范宏瑞(1963-), 男, 研究员, 研究方向: 岩石学和地球化学. E-mail: fanhr@mail.iggcas.ac.cn.

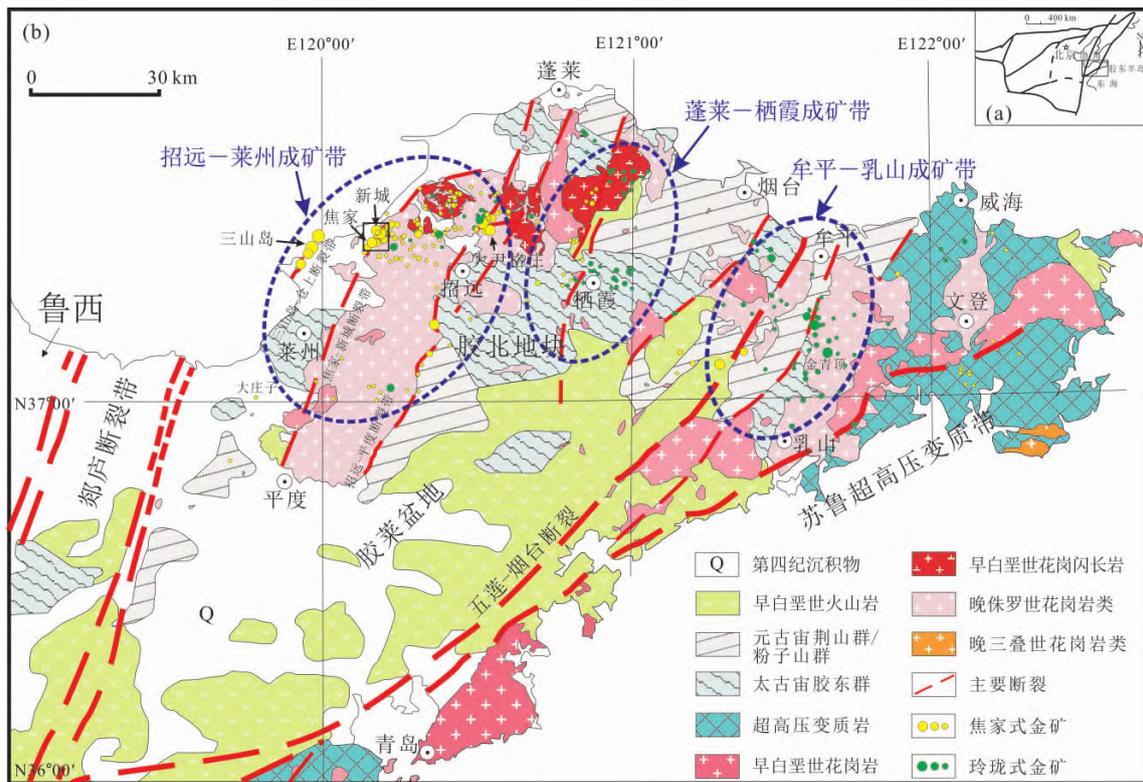
lieved that gold deposits in the Jiaodong Peninsula should share the common ore-forming fluid source but could contain relatively complicated ore-forming material sources with the addition of various amounts of sedimentary strata-derived materials.

**Key words:** fluid inclusion; microthermometry; vertical contrasting; Jiaojia gold deposit; the Jiaodong Peninsula

### 0 引言

胶东半岛是世界第三大金成矿省(图1),拥有超过4000 t的金资源量(范宏瑞等,2016)。胶东金矿独特的成因和成矿过程无法与世界上现有金成矿模型进行类比。为理解这一巨量金的超常富集机理,国内外学者根据已有研究结果对其归纳总结,提出了多种成矿模型,包括陆内非造山型金矿(翟明国等,2004a)、克拉通破坏型金矿(朱日祥等,2015)、特殊的“胶东型”金矿(Deng et al.,2015; Li et al.,2015)和造山型金矿(Goldfarb and Groves,2015, Groves et al.,2020)等。目前对胶东金矿成因较为一致的认识是:其形成与壳下交代富集地幔的脱挥发分有关(Mao et al.,2008; Yang and Santosh,2020; Groves et al.,2020; Deng et al.,2020; Zhu and Sun,2021)。然而,随着成果的积累和研究手段的进步,如矿物组合的深入研究、复杂

黄铁矿显微结构的发现,以及原位微区元素和同位素分析技术的运用,越来越多的迹象表明,胶东金矿的成矿过程较以往的认识更为复杂,甚至指示存在复杂的流体脉动过程(马伟东等,2015; Mills et al.,2015; Yang et al.,2016,2018; Feng et al.,2018; Li et al.,2018; 林祖菁等,2019; Hu et al.,2020b; Zhang et al.,2020; Liu et al.,2021; Peng et al.,2021)。对这些现象的揭示表明,先前提出的成矿模型能否合理解释胶东金矿复杂矿化过程仍存在疑问。如对于蚀变岩型金矿原型焦家金矿,Mills等(2015)对比过其浅部(地表以下100~300 m深度)①号(浸染状矿体)和③号矿体(粗脉状矿体)内黄铁矿的硫同位素和微量元素特征,并结合矿物组合中出现重晶石,认为焦家金矿在成矿晚期存在一期富Ag、氧化性的相对高盐度的流体脉动成矿事件。对于焦家金矿成矿流体的演化特征,尤其是在时空上的演化是否具有有一致性,尚待进一步研究。



修改自: Fan 等(2003) 翟明国等(2004b)

图1 胶东金成矿省区域地质图

Fig.1 The regional geological map of the Jiaodong gold province

为此,本文对焦家金矿 450 m 纵深范围不同深度的矿石样品进行流体包裹体显微测温研究,以期揭示成矿流体的时空演化特征,进而为焦家乃至胶东金矿的成矿流体演化过程提供参考。

### 1 区域地质背景

胶东半岛位于华北克拉通东南缘、郯庐断裂带以东,是一个主要由前寒武纪基底岩石和超高压变质岩块组成的、中生代构造-岩浆作用发育的内生热液型金矿集区(图 1),胶北地块和苏鲁超高压变质带就在这一区域内。胶北地块由胶北隆起和胶莱盆地两部分组成(图 1)。胶北地块区域上广泛出露太古宙胶东群、古元古代荆山群、古-中元古代粉子山群和新元古代蓬莱群(范宏瑞等,2016);主要发育北北东-北东向、东西向构造带(图 1),主要控矿断裂从西向东依次为三山岛-仓上、焦家-新城、招远-平度、栖霞和牟平-乳山断裂带,这五个断裂带及其次级断裂构造控制了区内金矿床的产出(图 1)(Deng et al.,2019)。

胶东半岛岩浆岩大部分形成于中生代,其中出露最广泛的为晚侏罗世壳源深熔钙碱性花岗岩(160~140 Ma),岩体呈东西向展布并横跨胶北隆起和苏鲁地体,典型的有玲珑黑云母花岗岩体、昆嵛山杂岩体等(郭敬辉等,2005; Yang et al.,2012)。早白垩世早期侵位的壳幔混源高钾钙碱性花岗岩(130~126 Ma),主要出露在三山岛、上

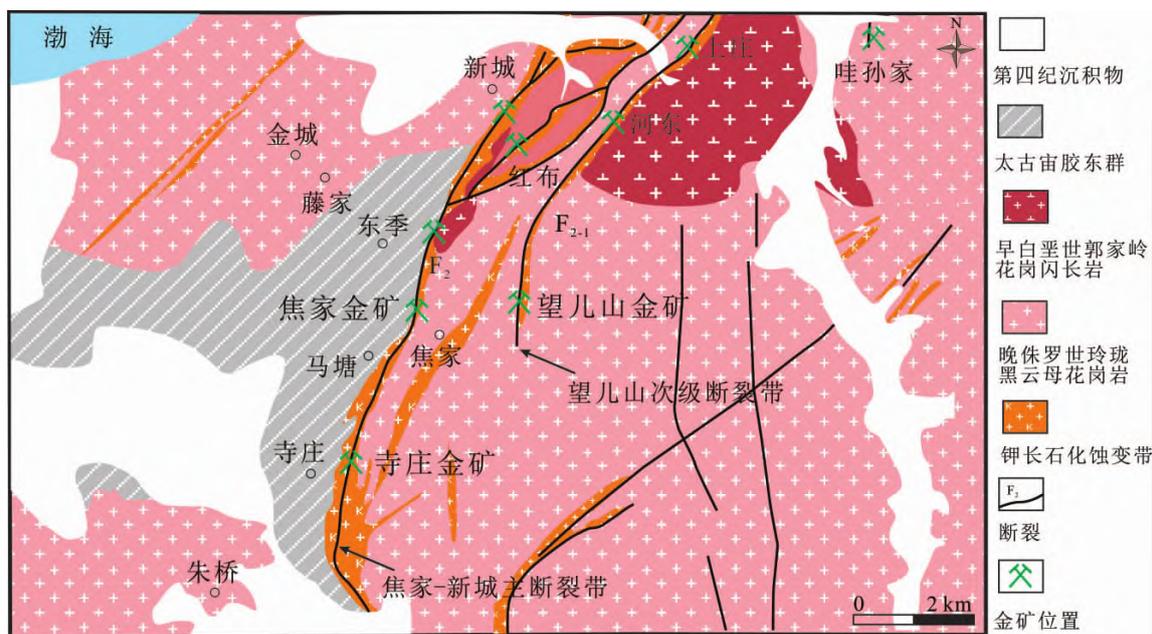
庄、北截、丛家和郭家岭地区,统称为郭家岭花岗闪长岩体(Yang et al.,2004; Jiang et al.,2016; Li et al.,2019);早白垩世晚期侵位的有壳幔混源碱性花岗岩(120~100 Ma),如艾山、崂山花岗岩等(Li et al.,2019)。

胶东金矿分为三大成矿带,主要发育蚀变岩型和石英脉型两大类金矿,由西向东分别为招远-莱州成矿带、蓬莱-栖霞成矿带和牟平-乳山成矿带(图 1)(范宏瑞等,2005),本次研究的焦家金矿位于招远-莱州成矿带内。

### 2 矿区地质及矿体特征

焦家金矿区主要出露太古宙胶东群和晚侏罗世玲珑黑云母二长花岗岩,矿体受焦家断裂及其旁侧次级断裂——望儿山断裂控制(北东走向、北西倾向)(图 2),其上盘为胶东群片麻岩,下盘为晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩,金矿体位于断裂带下盘蚀变的玲珑岩体内(图 3)。

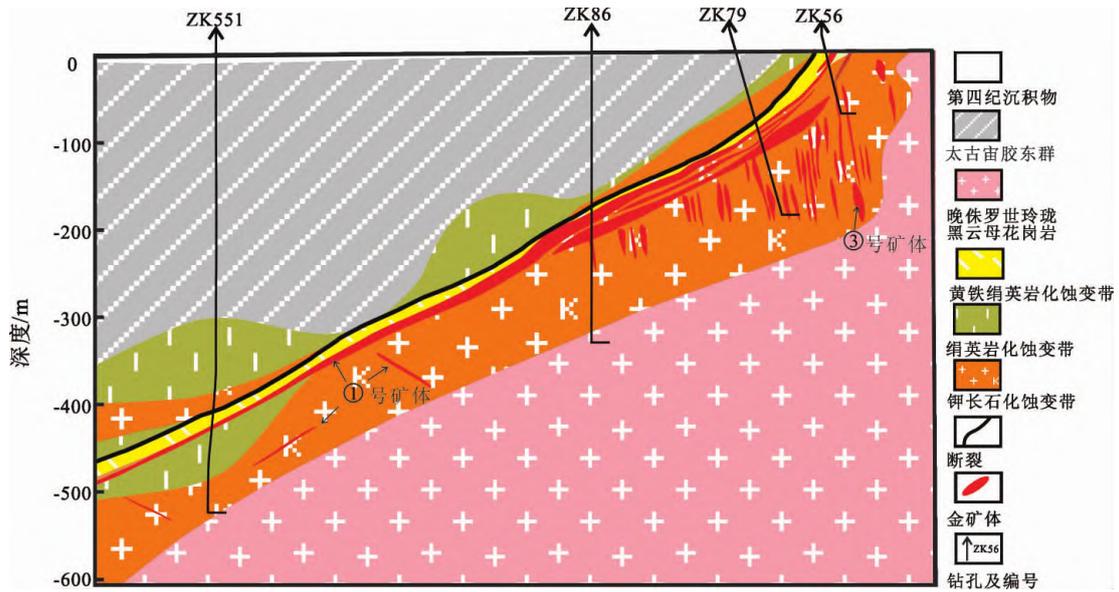
焦家金矿床具有典型的围岩蚀变分带特征,从断裂带往两侧依次发育黄铁绢英岩化、绢英岩化和钾长石化(图 3、4a~4i)。矿体为蚀变岩或以脉状矿化产于钾长石化带内(图 3、4c)。矿体呈层状、似层状产出,按产状可分为①号和③号矿体(图 3)。①号矿体主体产在主断裂带内并与断裂面平行(295°∠25°),局部可出现与之共轭的矿体,金资源量占焦家金矿的~85%(图 3)(宋明春等,2011)。



据宋明春等(2011)修改

图 2 焦家金矿区地质与金矿分布图

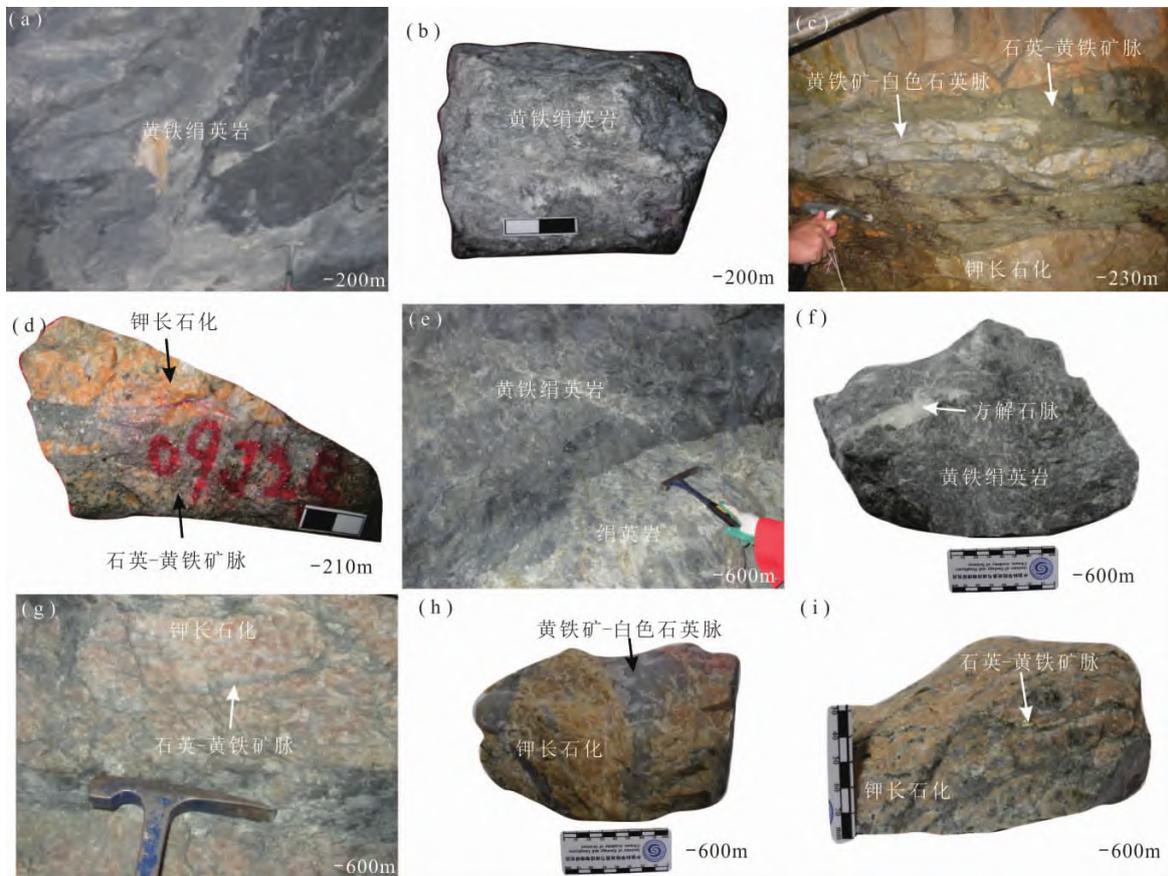
Fig.2 Geologic map of the Jiaojia gold deposit



据宋明春等(2011)修改

图3 焦家金矿112线矿体剖面图

Fig.3 The vertical geologic cross section of orebodies along the Exploration Line 112 in the Jiaojia deposit



(a) 井下矿床浅部断裂面及黄铁绢英岩带; (b) 矿床浅部黄铁绢英岩样品; (c) 矿床浅部钾长石化带内穿切宽大乳白色石英脉,被后期石英-黄铁矿脉穿切; (d) 矿床浅部石英-黄铁矿脉穿切钾长石化岩石手标本; (e) 矿床深部黄铁绢英岩叠加于绢英岩带上; (f) 矿床深部黄铁绢英岩被晚期方解石脉穿切; (g) 矿床深部网脉状石英-黄铁矿脉穿切钾长石化带; (h) 矿床深部少量黄铁矿-白色石英脉穿切钾长石化岩石手标本; (i) 矿床深部网脉状石英-黄铁矿脉穿切钾长石化带手标本

图4 焦家金矿不同深度蚀变-矿化现象及代表性样品

Fig.4 Alteration-mineralization phenomena of representative samples at different depths in the Jiaojia gold deposit

该类矿体以浸染状、网脉状矿化赋存于黄铁绢英岩化蚀变带内,部分形成于钾长石化带内(图3、4a、4b、4e、4f)。在焦家矿区,矿体在走向上延伸~960 m、平均厚度10.95 m,已控制的最大垂深1120 m(宋明春等,2011)。金平均品位在浅部矿体约为6 g/t,深部矿体为~4 g/t(宋明春等,2011)。焦家③号矿体赋存于-300 m以浅的断裂带下盘钾化带内(图3),以粗脉状、网脉状石英-硫化物产出,矿体走向平行主断裂,倾向与主断裂面相反且倾角为70°~90°,为焦家金矿贡献了~15%的金资源量(宋明春等,2011;杨真亮等,2017)。

### 3 样品与测试方法

#### 3.1 样品

为揭示不同矿化空间成矿流体的性质及演化,系统采集焦家金矿-167、-190、-210、-230、-250、-260、-270、-280、-330、-500、-550和-600 m不同标高矿体样品200余件,主要涵盖浅部③号矿体及①号矿体深部石英-硫化物脉状矿石。挑选120余件典型样品磨制成0.2 mm左右的双面抛光薄片,进行详细的矿相学和流体包裹体岩相学观察,然后选择各深度代表性样品20余件进行流体包裹体显微测温分析。

灰白色绢英岩由绢云母和石英组成,偶见少量黄铁矿,或被后期微细黄铁矿脉穿切(图4e),该带矿化较弱,一般无矿体产出。靠近主断裂面的黄铁绢英岩或者深部钾长石化带内穿切有微细黄铁矿脉,呈细脉浸染状、细网脉状构造(图4a、4b、4f、4g、4i),形成①号矿体;浅部钾长石化花岗岩中穿切有与主断裂面倾向相反、陡立状黄铁矿-白色石英脉,并被后期少量石英-黄铁矿脉穿切(图3、4c、4h、5a),其中金达到可开采品位则被圈为③号矿体。光学显微镜下观察到石英-黄铁矿脉内包含有自然金颗粒,并被后期含黄铜矿、自然金、方铅矿、闪锌矿等多金属硫化物脉穿切(图5c~5e)。最晚期热液方解石脉穿切先前的蚀变围岩和矿化脉体(图4f、5f)。根据井下脉体穿插关系和矿物共生组合,焦家金矿成矿阶段在深部和浅部均可分为少量黄铁矿-白色石英阶段(I)、石英-金-黄铁矿阶段(II)、石英-金-多金属硫化物阶段(III)和石英-碳酸盐阶段(IV)。其中阶段I为成矿早期,发育含少量浸染状黄铁矿的乳白色石英脉,石英为白色,黄铁矿呈立方体晶形并经历后期构造破碎(图5a)。阶段II和III为主成矿期,阶段II矿石有浸染状、细网脉状石英和黄铁矿,石英由于包含细粒浸染状黄

铁矿而呈烟灰色;阶段III多金属硫化物脉穿切阶段II。阶段IV为成矿晚期,以方解石为主。

#### 3.2 流体包裹体测试

鉴于③号矿体的特殊性和丰富的脉状矿化,且矿脉石英中流体包裹体发育、易于观察,因此本次研究主要针对③号矿体,辅以①号矿体样品进行流体包裹体研究。流体包裹体显微测温在中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室 Linkam THMS 600 型冷热台上进行。测试前,使用美国 FLUID INC 公司提供的人工合成流体包裹体标样对冷热台进行温度校正。该冷热台在-120~-70、-70~100和100~500 °C 温度区间的测定精度分别为±0.5、±0.2和±2 °C。升温速率控制在0.2~10 °C/min,含CO<sub>2</sub>包裹体在其相转变温度(如固态CO<sub>2</sub>熔化和笼合物熔化)附近升温速率降为0.2 °C/min,在水溶液包裹体冰点和均一温度附近升温速率降为0.2~0.5 °C/min。流体包裹体成分(摩尔分数)、盐度、CO<sub>2</sub>密度、总密度等利用 MacFLINCOR (Brown and Hagemann, 1995) 程序计算获得。

### 4 测试结果

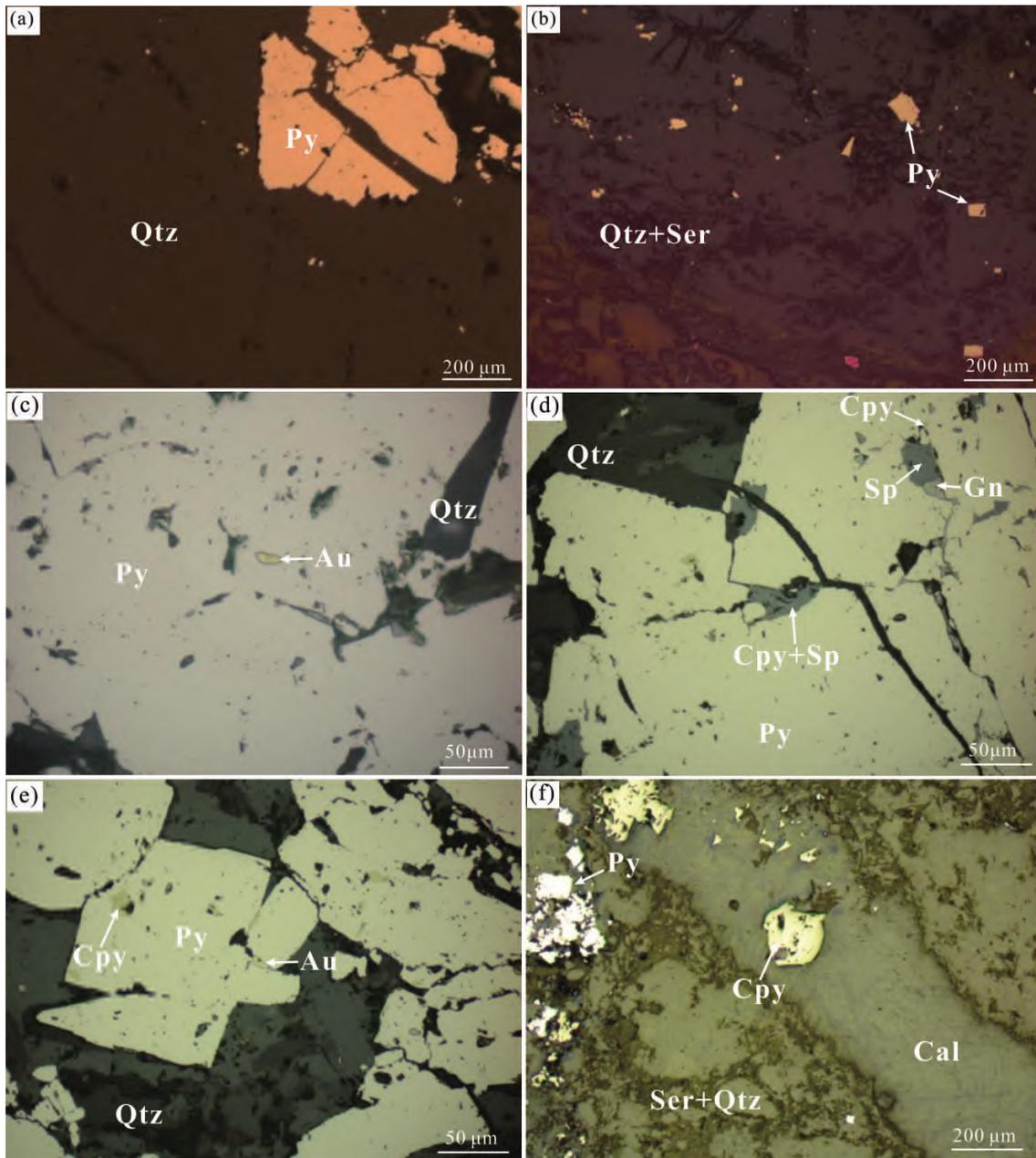
#### 4.1 流体包裹体类型和成分

根据室温下流体包裹体的相态特征,将焦家金矿中的流体包裹体分为三类:①CO<sub>2</sub>包裹体(I型),该类包裹体多呈浑圆状发育于石英-硫化物脉中(图6a)。②H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>包裹体(II型),该类包裹体是焦家金矿最主要的流体包裹体类型,可进一步分为II a型和II b型。II a型为富水的H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>两相包裹体,室温时为含单一气相(V<sub>CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O</sub>)和液相L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>,气相一般占包裹体总体积的5%~40%(图6b、6e);II b型为含水三相包裹体,通常V<sub>CO<sub>2</sub></sub>+L<sub>CO<sub>2</sub></sub>占包裹体总体积的20%~80%(图6c)。II a和II b型可构成流体包裹体群(图6f)。③H<sub>2</sub>O包裹体(III型),分为气液两相(V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)和单液相(L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)(图6d、6e)。

#### 4.2 流体包裹体分布特征

显微镜观察可见,流体包裹体普遍发育在乳白色石英脉、浸染状及网脉状石英-黄铁矿脉、石英-多金属硫化物脉及石英-碳酸盐脉中,大小多为4~12 μm,其丰度、类型及组合等在不同阶段存在一定差异。

(1) 早期乳白色石英脉中石英呈乳浊状,在半透明石英颗粒中广泛发育原生II a和II b型H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>包裹体,这类包裹体多呈群或随机分布,大小多



(a) 黄铁矿-白色石英阶段少量自形-半自形黄铁矿散布在纯石英中; (b) 黄铁矿绢英岩中碎裂浸染状黄铁矿; (c) 石英-黄铁矿脉中包体金颗粒; (d) 石英-黄铁矿脉被石英-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿微细脉穿切; (e) 石英-黄铁矿脉被石英-金-黄铜矿微细脉穿切; (f) 石英-方解石脉穿切黄铁矿绢英岩。矿物符号: Au-自然金; Cpy-黄铜矿; Gn-方铅矿; Py-黄铁矿; Qtz-石英; Ser-绢云母; Sp-闪锌矿

图5 焦家金矿矿石矿物显微镜下观察

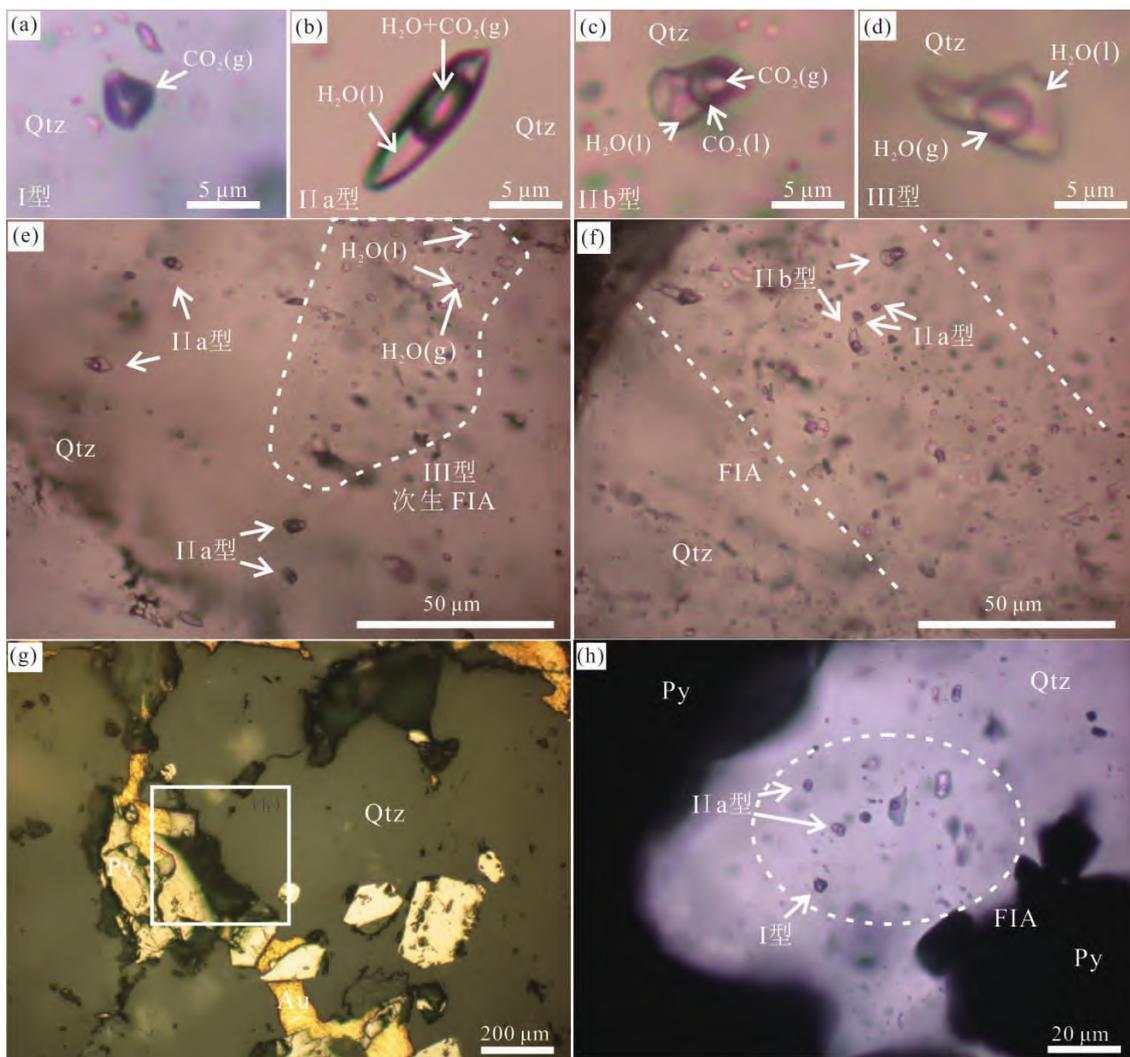
Fig.5 Micrographs showing microtexture characteristics of various minerals in ores of the Jiaojia gold deposit

为4~8 μm。沿石英裂隙发育次生椭圆及不规则状II型和III型包裹体,局部偶见I型CO<sub>2</sub>包裹体呈小群或随机分布并与IIa型包裹体共存。III型水溶液包裹体多沿早期石英裂隙线状分布。

(2) 石英-黄铁矿脉和石英-多金属硫化物脉中的石英呈透明的自形或半自形特征,在黄铁矿及金颗粒边缘的石英中发育有IIa和少量IIb型流体包

裹体(图6g、6h),这些流体包裹体呈小群分布,应是与金沉淀同期捕获的原生包裹体,大小多为4~12 μm。局部可见零星出现的I、III型流体包裹体,并与II型包裹体共生(图6h)。

(3) 石英-碳酸盐脉中石英呈乳浊状,局部与方解石共生的石英干净透明,发育少量较小的纯液相或气液两相III型包裹体,这类包裹体也可呈流体包



FIA-流体包裹体组合; Py-黄铁矿; Au-自然金; Qtz-石英  
 图6 焦家金矿石英脉体中不同类型流体包裹体特征

Fig.6 Characteristics of different types of fluid inclusions in quartz veins at Jiaojia

裹体组合(FIA)沿裂隙穿切先前的石英颗粒(图6e)。

### 4.3 流体包裹体显微测温结果

本次对成矿阶段包裹体和流体包裹体组合(FIA)进行系统测温,共获得150余组数据,结果见表1。

成矿早阶段白色石英中主要为H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>型(II型)包裹体。实验测得该类流体包裹体的初熔温度为-56.7~-56.6℃,表明包裹体气相为纯CO<sub>2</sub>(纯CO<sub>2</sub>的三相点温度为-56.6℃)。继续升温获得CO<sub>2</sub>笼合物熔化温度为4.4~8.9℃、CO<sub>2</sub>部分均一温度为16.0~29.5℃。绝大部分包裹体完全均一到液相,仅个别均一为气相,完全均一温度为271~359℃。计算得到流体盐度为6.0%~10.0% NaCl<sub>eqv</sub>。其中II型流体包裹体为典型的富含挥发分

流体,其X<sub>CO<sub>2</sub></sub>可达0.1~0.3,集中在0.1~0.15之间,总流体密度为0.58~0.98 g/cm<sup>3</sup>。

主成矿阶段石英中捕获有大量原生流体包裹体,丰度从大到小依次为H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>(II型)、H<sub>2</sub>O(III型)和CO<sub>2</sub>(I型)包裹体。II型包裹体的CO<sub>2</sub>初熔温度为-56.9~-56.6℃,接近纯CO<sub>2</sub>的三相点温度,表明CO<sub>2</sub>相中可能存在微量CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>或H<sub>2</sub>S等气体;CO<sub>2</sub>笼合物熔化温度为4.6~8.8℃,部分均一温度为17.2~31.1℃,完全均一温度为198~315℃。该阶段捕获的流体包裹体主要均一至液相,极个别均一至气相。III型包裹体的冰点温度为-3.7~-0.2℃,完全均一温度为213~272℃。CO<sub>2</sub>包裹体(I型)室温下为一相或两相,其初熔温度主要为-57.2~-56.6℃,为纯CO<sub>2</sub>相,其部分均一温度为7.1~27.9℃。计算得到的流体盐度为4.2%~9.7%

表1 焦家金矿流体包裹体显微测温结果

Table 1 The microthermometric results of fluid inclusions in the Jiaojia gold deposit

成矿阶段	主要包裹体类型	$t_{m,CO_2}/^{\circ}C$	$t_{m,fl}/^{\circ}C$	$t_{h,CO_2}/^{\circ}C$	$t_{m,ice}/^{\circ}C$	$t_{h,TOT}/^{\circ}C$
成矿早阶段( I )	II b 型	-56.7~-56.6	4.4~8.9	16~29.5	—	271~359
主成矿阶段 ( II、III )	II a、II b 型	-56.9~-56.6	4.6~8.8	21~31.1	—	198~315
	I 型	-57.2~-56.6	—	17.2~30.8(v)	—	—
	III 型	—	—	7.1~27.9	—	—
成矿晚阶段( IV )	III 型	—	—	—	-3.7~-0.2	213~272
					-6.8~-0.3	102~188

注:  $t_{m,CO_2}$  为固相  $CO_2$  熔化温度;  $t_{m,fl}$  为笼合物熔化温度;  $t_{h,CO_2}$  为  $CO_2$  部分均一温度;  $t_{m,ice}$  为冰点;  $t_{h,TOT}$  为完全均一温度; (v) 为部分均一至气相, 未注明为部分均一至液相或临界均一; “—”表示无数据。

$NaCl_{eqv}$  集中在 6.5%~8.5%  $NaCl_{eqv}$  之间。该阶段流体包裹体相比比例变化较大, 有低密度(0.32~0.83  $g/cm^3$ ) 流体和高密度(0.89~1.02  $g/cm^3$ ) 流体共存现象。

成矿晚阶段石英中只发育  $H_2O$  单相和气液两相包裹体(III型), 其冰点温度为-6.8~-0.3  $^{\circ}C$ , 升温后均一至液相, 均一温度为 102~188  $^{\circ}C$ 。该阶段流体为几乎不含挥发分的高密度流体(0.95~1.02  $g/cm^3$ ), 其盐度为 0.2%~10.0%  $NaCl_{eqv}$ , 集中在 0.2%~3.8%  $NaCl_{eqv}$  之间。

## 5 讨论

### 5.1 成矿流体时间上的演化

将实验获得的三个成矿阶段流体的数据投图到完全均一温度-盐度图上, 可知从早阶段到晚阶段, 成矿流体温度逐渐降低, 盐度从成矿早阶段到主成矿阶段轻微降低, 到成矿晚阶段明显降低(图7)。前人对胶东金矿矿化石英脉中石英流体包裹体显微测温结果表明, 胶东金矿成矿早阶段( I ) 主要为  $H_2O-CO_2-NaCl$  气液两相或者三相包裹体、纯  $CO_2$  包裹体, 完全均一温度 330~410  $^{\circ}C$ , 成矿流体密度为 0.55~1.03  $g/cm^3$ ; 主成矿阶段( II 和 III ) 主要为  $H_2O-CO_2-NaCl \pm CH_4$  气液两相或者三相、纯  $CO_2$  包裹体和  $H_2O-NaCl$  气液两相包裹体, 完全均一温度为 250~320  $^{\circ}C$ , 成矿流体密度为 0.80~1.04  $g/cm^3$ ; 成矿晚阶段( IV ) 主要为  $H_2O-NaCl$  气液两相和液相包裹体, 完全均一温度为 150~230  $^{\circ}C$ , 成矿流体密度为 0.85~1.00  $g/cm^3$ ; 各成矿阶段流体的盐度变化范围相似, 主要为 0~13.3%  $NaCl_{eqv}$  (Fan et al., 2003; 胡芳芳等 2007; Wang et al., 2015; Wen et al., 2015, 2016; Yang et al., 2017; Li et al., 2018; Cai et al., 2018; Ma et al., 2018)。可见, 胶东金矿流体包裹体完全均一温度、盐度和流体密度在各矿床、各成矿阶段具有相似的范围和变化特

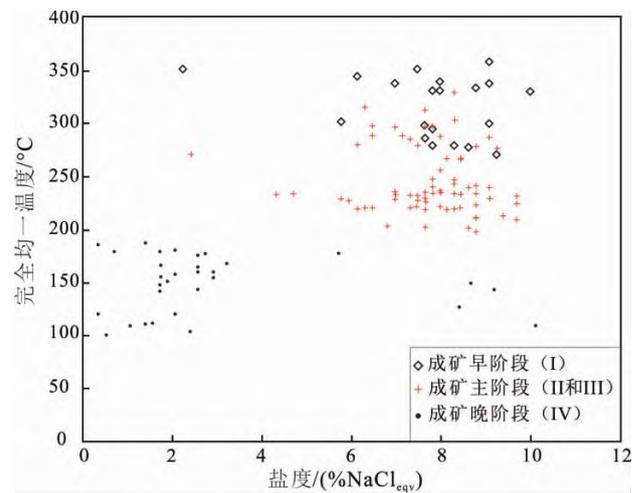


图7 焦家金矿流体包裹体完全均一温度-盐度关系图

Fig.7 The binary diagram of total homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in quartz veins at Jiaojia

征, 均显示中低温、低盐度特征。本次获得的焦家金矿不同阶段的流体包裹体类型、室温下的相态特征、完全均一温度、盐度及演化趋势与胶东其他金矿的流体包裹体完全一致, 表明焦家金矿成矿流体同属于胶东金矿统一来源与演化的成矿流体的一部分(范宏瑞等, 2005; Mao et al., 2008; Yang et al., 2017; Ma et al., 2018)。

### 5.2 成矿流体特征垂向对比研究

为系统研究矿区在垂向上成矿流体性质及演化特征, 将流体包裹体显微测温结果按不同标高不同成矿阶段进行投图, 建立矿区垂向上的流体包裹体完全均一温度和盐度剖面图(图8a、8b)。焦家矿区从-167 m 到大约-600 m 深度成矿流体对比分析结果表明: (1) 各成矿阶段流体包裹体均一温度在垂向上基本稳定, 不存在随深度加大而温度升高现象; (2) 成矿流体盐度在成矿早阶段和主成矿阶段变化不明显, 而在成矿晚阶段整体盐度降低, 属于典型中低盐度流体, 并且盐度在垂向上基本稳定,

不存在随深度加大而变化的现象。

Mills 等(2015)在研究焦家金矿①号和③矿体(主要为-300 m 以浅的脉状矿化)过程中,测得①号矿体中黄铁矿群体硫同位素组成(8‰~13‰,平均 10.41‰)相对③号矿体(10‰~13‰,平均 11.42‰)轻微偏低,并且③号矿体中相对富集 Ag 和 Pb、局部出现少量重晶石。基于所获得的结果, Mills 等(2015)提出焦家金矿成矿晚阶段存在一期低温、富 Ag、相对高氧化性和盐度的成矿流体脉动成矿事件。然而,本次对赋存在钾长石化带内的不同阶段、不同深度脉状矿体捕获的流体包裹体进行对比研究表明,成矿流体的性质和演化在深度上基本一致,且与胶东其他同时代金矿的流体性质和演化一致。结合焦家金矿不同蚀变带构造网络的连通性,以及前人对胶东金矿成矿流体性质的研究(Fan et al., 2003; 姜晓辉等, 2011; 刘玄等, 2011; Hu et al., 2013, 2020c; Wang et al., 2015; Wen et al., 2015; 卫清等, 2015; Yang et al., 2017; Cai et al., 2018; Wei et al., 2019),我们认为焦家金矿③号和①号矿体应是同一应力场下、同一来源流体在不同构造部位演化成矿的结果。

Wen 等(2016)依托胶东三山岛金矿勘探深钻,对纵深 4 000 m 的成矿流体性质进行了研究,结果表明在不同深度、不同成矿阶段流体包裹体的完全均一温度和盐度变化不大,且与胶东其他同时代金矿流体性质和演化一致。结合前人研究结果及本次焦家金矿成矿流体包裹体垂向对比结果,胶东金矿成矿流体具有统一的演化过程,且至少在纵深 4 000 m 深度范围内具有较为稳定的成矿流体条件。

### 5.3 对胶东金矿成矿作用的启示

胶西北焦家-新城断裂带控制了焦家、新城、寺庄、望儿山、上庄等中-超大型金矿,三山岛-仓上断裂带控制了海域、三山岛、新立、仓上等大-超大型金矿,其金资源量占胶西北金矿的三分之二以上(范宏瑞等, 2005; Deng et al., 2015; Wen et al., 2016; Yang et al., 2016, 2017; Cai et al., 2018; Zhang et al., 2020)。因此在焦家-新城和三山岛-仓上断裂带内发生了巨量的成矿流体活动。在这一流体演化过程中,高效的 Au 沉淀机制主要有四种,即硫化作用、流体不混溶作用、流体还原作用及 Au-As 耦合替代作用(Fan et al., 2003; Li et al.,

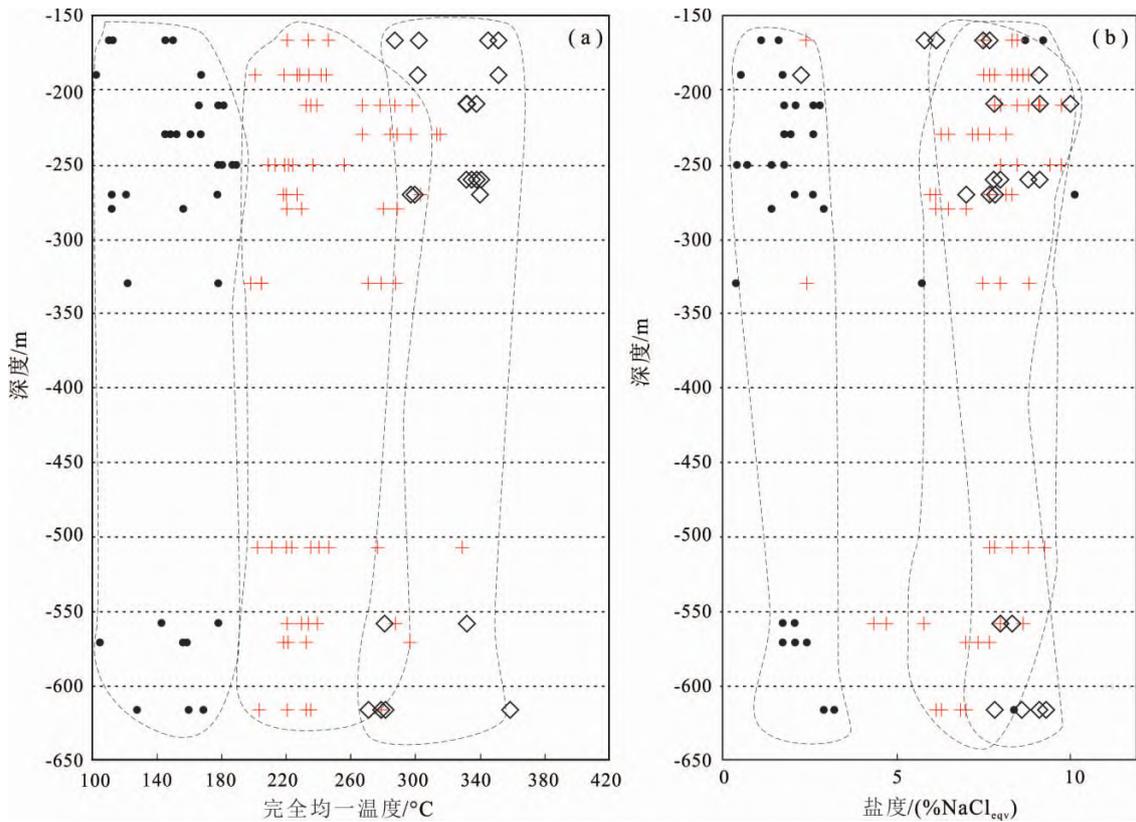


图 8 焦家金矿流体包裹体完全均一温度(a)和盐度(b)随深度变化图

Fig.8 The binary diagrams for total homogenization temperature-depth (a) and salinity-depth (b) of fluid inclusions at Jiaojia

2013; Wang et al., 2015; Wen et al., 2016; Wei et al., 2019; Hu et al., 2020a; Liu et al., 2021; Peng et al., 2021) 其中硫化作用和流体不混溶作用是最主要的沉淀机制, 在胶西北矿床中普遍出现。本次在焦家金矿中观察到与自然金、黄铁矿等硫化物共沉淀的石英中发育 I 型和 II 型流体包裹体共存现象(图 6g, 6h), 且均一温度相近, 指示金和黄铁矿沉淀过程存在不同组成的  $H_2O-CO_2$  流体相(即流体不混溶)。在中酸性和中低温条件下,  $Au(HS)_2^-$  是 Au 在成矿流体中主要的迁移形式(Stefánsson and Seward, 2004)。而成矿流体中  $H_2S$  的丢失(通过硫化或者流体不混溶作用实现)不仅能够快速降低 Au 的溶解度, 也能够控制金属硫化物和氧化物组合的演化, 该过程在胶东寺庄金矿中有完整呈现(Hu et al., 2020a)。因此, 本次在焦家金矿中观察到的金与硫化物和流体不混溶共存现象, 说明硫化作用和流体不混溶作用是其主要的金沉淀机制。相对而言, 流体还原和 Au-As 耦合替代作用只出现在少数金矿的局部矿化部位, 多种金沉淀机制的识别暗示胶东金成矿过程可能更为复杂。

对胶东金矿流体包裹体的系统研究表明, 成矿流体具有统一的来源和演化, 且在至少 4 000 m 成矿深度具有稳定的地球化学特征。然而, 近年来的工作也发现, 焦家-新城、三山岛-仓山断裂带的不同金矿体也存在一些独特性, 暗示成矿流体尚有复杂的物理化学条件和成矿物质来源未被完全揭示。例如, 在成矿流体物理化学条件演化方面, 流体还原作用(识别出较高含量  $CH_4$  的流体包裹体)仅在三山岛金矿体内被发现(Fan et al., 2003; Wen et al., 2016)。Wen 等(2016)认为成矿流体中  $CH_4$  的升高是由于围岩中的角闪石、钛铁矿、斜长石和水发生反应形成榍石、氢气以及阳起石(或绿泥石), 氢气将  $CO_2$  进一步还原为  $CH_4$ 。Mills 等(2015)则根据脉石矿物中重晶石的出现认为成矿晚期流体偏氧化性(Mills et al., 2015), 属于成矿晚期低温、相对高氧化性、高盐度的流体脉动成矿。事实上, 在焦家、新城、寺庄、三山岛等金矿中, 均在主成矿期沉淀磁黄铁矿、磁铁矿、重晶石, 且重晶石以细脉穿切黄铁矿(Mills et al., 2015; Wen et al., 2016; Yang et al., 2016; Hu et al., 2020a)。基于这些现象, Hu 等(2020a)通过热力学模拟预测流体中总硫浓度的降低对矿物组合稳定域变化的控制, 提出流体中  $H_2S$  丢失能够导致以上复杂矿物组合的出现。除了这些复杂的流体物理化学条件演化, 流体中成

矿物质来源也显示复杂的变化。例如, 含砷黄铁矿或毒砂主要出现在三山岛金矿中(Fan et al., 2003; Wen et al., 2016; Peng et al., 2021), 最近在寺庄金矿局部脉体中也发现有少量含砷黄铁矿(Liu et al., 2021)。在上庄金矿中, Cai 等(2018)报导了在多金属阶段沉淀有辉钼矿。这些微量元素的富集表明, 在成矿过程中局部地段有富 As 或者富 Mo 流体的加入, 而 As 和 Mo 往往在地壳中更为丰富。因此, 成矿过程局部有不同特征壳源物质进入成矿流体。此外, 焦家-新城断裂带和三山岛-仓山断裂带控制的矿床中的  $\delta^{34}S$  变化较大, 群体分析可从 1.9‰ 变化到 13.0‰(Mao et al., 2008; Deng et al., 2015; Mills et al., 2015; Wen et al., 2016; Yang et al., 2017)。新近利用纳米离子探针分析发现, 望儿山金矿矿化石英脉体中局部包含的黄铁矿颗粒的  $\delta^{34}S$  可高达 21.7‰, 显然有起源于沉积地层的物质参与(Hu et al., 2020b)。这种宽泛的  $\delta^{34}S$  范围暗示成矿物质来源更为复杂, 需要更多研究来揭示其原因。

胶东金矿成矿流体的统一来源与演化过程, 最有可能受控于被洋壳脱挥发分交代了的深部岩石圈, 在克拉通破坏背景下发生流体释放过程(Yang and Santosh, 2020; Deng et al., 2020; Groves et al., 2020; Zhu and Sun, 2021)。而胶西北金矿宽泛的硫同位素组成、多变的微量元素特征则暗示成矿物质源区更为复杂。因此, 本文和前人研究成果表明, 胶东金矿深部成矿流体起源、成矿物质源区贡献比现有认识更为复杂。如成矿物质来源与成矿流体来源的关系如何? 为什么焦家-新城断裂带、三山岛-仓上断裂带上的金矿整体一致而局部又各有差异? 胶东中部、东部金矿是否也存在一致的现象? 回答这些问题需要更为精细的工作来揭示成矿过程, 以现有一致认识为基础细化成矿过程, 从而加深对胶东金矿成因的认识。

## 6 结论

- (1) 焦家金矿成矿流体为典型的中低温、中低盐度  $H_2O-CO_2-NaCl$  流体体系, 与胶东其他金矿成矿流体特征与演化一致;
- (2) 焦家金矿在垂向 450 m 剖面上成矿流体特征与演化保持一致, 其③号和①号矿体应是同一来源流体在不同构造部位演化成矿的结果;
- (3) 硫化作用和流体不混溶是主要的金沉淀机制;
- (4) 通过对比前人研究成果, 表明胶东金矿具

有统一的流体来源,但成矿物质显示出更为复杂的源区,应有源于沉积地层的物质加入。

致谢: 野外工作得到山东黄金集团焦家金矿地测部门和中国科学院地球化学研究所蓝廷广研究员的指导和协助,在此一并致谢!

#### 参考文献 (References):

- Brown P E, Hagemann S G. 1995. MacFlinCor and its application to fluids in Archean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19): 3943-3952
- Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Li X H. 2018. De-cratonic gold mineralization: Evidence from the Shangzhuang gold deposit, eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 54: 1-22
- Deng J, Liu X F, Wang Q F, Pan R G. 2015. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions. *Ore Geology Reviews*, 65: 674-686
- Deng J, Yang L Q, Li R H, Groves D I, Santosh M, Wang Z L, Sai S X, Wang S R. 2019. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the Giant Jiaodong Gold Province, China. *Geological Journal*, 54(1): 378-391
- Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F, Wang Q F. 2020. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Science Reviews*, 208: 103274
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38(6): 739-750
- Feng K, Fan H R, Hu F F, Yang K F, Liu X, Shangguan Y N, Cai Y C, Jiang P. 2018. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: Evidence from trace element mapping and *in-situ* sulfur isotope composition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 304-321
- Goldfarb R J, Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2-26
- Groves D I, Santosh M, Deng J, Wang Q F, Yang L Q, Zhang L. 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275-292
- Hu F F, Fan H R, Jiang X H, Li X C, Yang K F, Mernagh T. 2013. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Geofluids*, 13(4): 528-541
- Hu H L, Fan H R, Liu X, Cai Y C, Yang K F, Ma W D. 2020a. Two-stage gold deposition in response to H<sub>2</sub>S loss from a single fluid in the Sizhuang deposit (Jiaodong, China). *Ore Geology Reviews*, 120: 103450
- Hu H L, Fan H R, Santosh M, Liu X, Cai Y C, Yang K F. 2020b. Ore-forming processes in the Wang'ershan gold deposit (Jiaodong, China): Insight from microtexture, mineral chemistry and sulfur isotope compositions. *Ore Geology Reviews*, 123: 103600
- Hu H L, Liu S L, Fan H R, Yang K F, Zuo Y B, Cai Y C. 2020c. Structural networks constraints on alteration and mineralization processes in the Jiaojia gold deposit, Jiaodong peninsula, China. *Journal of Earth Science*, 31(3): 500-513
- Jiang P, Yang K F, Fan H R, Liu X, Cai Y C, Yang Y H. 2016. Titanite-scale insights into multi-stage magma mixing in Early Cretaceous of NW Jiaodong terrane, North China Craton. *Lithos*, 258-259: 197-214
- Li L, Santosh M, Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. *Ore Geology Reviews*, 65: 589-611
- Li X C, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Lan T G. 2013. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Ore Geology Reviews*, 53: 403-421
- Li X H, Fan H R, Yang K F, Hollings P, Liu X, Hu F F, Cai Y C. 2018. Pyrite textures and compositions from the Zhuangzi Au deposit, southeastern North China Craton: Implication for ore-forming processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(9): 73
- Li X H, Fan H R, Hu F F, Hollings P, Yang K F, Liu X. 2019. Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeastern North China Craton. *Lithos*, 324-325: 280-296
- Liu Z K, Mao X C, Jedemann A, Bayless R C, Deng H, Chen J, Xiao K Y. 2021. Evolution of pyrite compositions at the Sizhuang gold deposit, Jiaodong peninsula, Eastern China: Implications for the genesis of jiaodong-type orogenic gold mineralization. *Minerals*, 11(4): 344
- Ma W D, Fan H R, Liu X, Yang K F, Hu F F, Zhao K D, Cai Y C, Hu H L. 2018. Hydrothermal fluid evolution of the Jintingling gold deposit in the Jiaodong peninsula, China: Constraints from U-Pb age, CL imaging, fluid inclusion and stable isotope. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 287-303
- Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q, Wang R T. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4): 361-381
- Mills S E, Tomkins A G, Weinberg R F, Fan H R. 2015. Anomalously silver-rich vein-hosted mineralisation in disseminated-style gold deposits, Jiaodong gold district, China. *Ore Geology Reviews*, 68: 127-141
- Peng H W, Fan H R, Liu X, Wen B J, Zhang Y W, Feng K. 2021. New insights into the control of visible gold fineness and deposition: A case study of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong, China. *American Mineralogist*, 106(1): 135-149
- Stefánsson A, Seward T M. 2004. Gold(I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500°C at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4121-4143
- Wang Z L, Yang L Q, Guo L N, Marsh E, Wang J P, Liu Y, Zhang C, Li R H, Zhang L, Zheng X L, Zhao R X. 2015. Fluid immiscibility and gold deposition in the Xincheng deposit, Jiaodong Peninsula, China: A fluid inclusion study. *Ore Geology Reviews*, 65: 701-717

- Wei Y J, Yang L Q, Feng J Q, Wang H, Lv G Y, Li W C, Liu S G. 2019. Ore-fluid evolution of the Sizhuang orogenic gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Minerals*, 190(3): 190
- Wen B J, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Pirajno F, Yang K F. 2015. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope. *Ore Geology Reviews*, 65: 643-658
- Wen B J, Fan H R, Hu F F, Liu X, Yang K F, Sun Z F, Sun Z F. 2016. Fluid evolution and ore genesis of the giant Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China: Constrains from geology, fluid inclusions and H-O-S-He-Ar isotopic compositions. *Journal of Geochemical Exploration*, 171: 96-112
- Yang C X, Santosh M. 2020. Ancient deep roots for Mesozoic world-class gold deposits in the north China craton: An integrated genetic perspective. *Geoscience Frontiers*, 11(1): 203-214
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3-4): 145-160
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Wilde S A, Lan T G, Lu L N, Liu Y S. 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*. 146-147: 112-127
- Yang K F, Jiang P, Fan H R, Zuo Y B, Yang Y H. 2018. Tectonic transition from a compressional to extensional metallogenic environment at ~120 Ma revealed in the Hushan gold deposit, Jiaodong, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 408-425
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, Guo L N, Li R H, Groves D I, Danyush-evsky L V, Zhang C, Zheng X L, Zhao H. 2016. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong peninsula, China: Implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment. *Economic Geology*, 111(1): 105-126
- Yang L Q, Guo L N, Wang Z L, Zhao R X, Song M C, Zheng X L. 2017. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang'er-shan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 88: 491-510
- Zhang Y W, Hu F F, Fan H R, Liu X, Feng K, Cai Y C. 2020. Fluid evolution and gold precipitation in the Muping gold deposit (Jiaodong, China): Insights from in-situ trace elements and sulfur isotope of sulfides. *Journal of Geochemical Exploration*, 218: 106617
- Zhu R X, Sun W D. 2021. The big mantle wedge and decratonic gold deposits. *Science China Earth Sciences*, doi: 10.1007/s11430-020-9733-1
- 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
- 范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 胡芳芳, 杨奎锋. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用. *岩石学报*, 32(10): 3225-3238
- 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
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨奎锋, 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
- 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 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
- 林祖苇, 赵新福, 熊乐, 朱照先. 2019. 胶东三山岛金矿床黄铁矿原位微区微量元素特征及对矿床成因的指示. *地球科学进展*, 34(4): 399-413
- 刘玄, 范宏瑞, 胡芳芳, 郑小礼, 蓝廷广, 杨奎锋. 2011. 胶东大庄子金矿成矿流体及稳定同位素研究. *矿床地质*, 30(4): 675-689
- 马伟东, 张德贤, 王智琳, 鲁安怀, 崔宇, 左红燕. 2015. 胶东大尹格庄金矿与夏甸金矿矿化特征对比研究. *矿物岩石地球化学通报*, 34(1): 191-200
- 宋明春, 宋英昕, 崔书学, 姜洪利, 袁文花, 王化江. 2011. 胶东焦家特大型金矿床深、浅部矿体特征对比. *矿床地质*, 30(5): 923-932
- 卫清, 范宏瑞, 蓝廷广, 刘玄, 姜晓辉, 文博杰. 2015. 胶东寺庄金矿床成因: 流体包裹体与石英溶解度证据. *岩石学报*, 31(4): 1049-1062
- 卫清, 范宏瑞, 蓝廷广, 刘玄. 2015. 胶东寺庄金矿热液蚀变作用与元素迁移规律. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 283-293
- 杨真亮, 解天赐, 刘天鹏, 张坤, 李瑞翔, 王永庆. 2017. 焦家成矿带 III 号矿体群成矿特征浅析及其找矿意义. *山东国土资源*, 33(9): 14-18
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004a. 非造山带型金矿: 胶东型金矿的陆内成矿作用. *地学前缘*, 11(1): 85-98
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004b. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. *地学前缘*, 11(3): 285-297
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. *中国科学: 地球科学*, 45(8): 1153-1168

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)