

# 冀东高家店金矿床成因: 来自金及载金黄铁矿化学成分、流体包裹体和氢氧硫同位素的证据\*

杨爱雪, 吕水\*\*, 许曼, 邢运涛, 刘海龙, 韦文国, 安梦莹

(河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队(河北省海洋地质环境调查中心), 河北唐山 063000)

**摘要** 高家店金矿床位于华北克拉通北缘冀东矿集区中部, 为典型的蚀变岩型金矿床, 少部分为石英脉型, 赋存于高家店岩体的花岗岩和闪长岩内, 受断裂构造控制。为了探讨高家店金矿床的成因, 文章对其开展了详细的矿床地质特征、金及载金黄铁矿化学成分、流体包裹体和氢氧硫同位素研究。结果表明, 高家店金矿床热液成矿期包括4个阶段, 其中II和III阶段为金的主要成矿阶段。黄铁矿是金的主要载体矿物, 金矿物为自然金和银金矿, 以独立的金矿物的形式赋存于黄铁矿中。主成矿阶段黄铁矿Fe和S含量及Fe/S元素比值揭示金矿床具有岩浆热液型的特征。主成矿阶段流体包裹体类型以富液相的两相H<sub>2</sub>O溶液包裹体为主, 其次为含CO<sub>2</sub>三相包裹体, 属中温、中低盐度流体。不同成矿阶段的流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为1.82‰~5.60‰,  $\delta\text{D}$ 值为-83.3‰~-55.3‰, 指示流体主要来自岩浆水, 并有少量大气降水混入。主成矿阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.40‰~5.61‰, 显示地幔硫或岩浆硫特征, 揭示成矿物质硫主要来自于深部岩浆。综合研究认为, 高家店岩体的多期次岩浆侵入活动为金成矿提供了充足的热源及成矿流体, 因而高家店金矿床成因类型为岩浆热液型。

**关键词** 黄铁矿; 电子探针; 流体包裹体; 氢氧硫同位素; 高家店金矿床; 冀东

中图分类号: P578.2\*92; P618.51

文献标志码: A

## Genesis of Gaojiadian gold deposit in eastern Hebei Province: Evidences from chemical composition of gold and gold-bearing pyrite, fluid inclusions, and H-O-S isotopes

YANG AiXue, LÜ Shui, XU Man, XING YunTao, LIU HaiLong, WEI WenGuo and AN MengYing

(The Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration (Hebei Marine Geological Environment Survey Centre), Tangshan 063000, Hebei, China)

### Abstract

The Gaojiadian gold deposit is located in the central part of the ore concentration area from eastern Hebei Province on the northern North China Craton. It is a typical altered rock type gold deposit, with a small portion being quartz vein type. It occurs in the granite and diorite of the Gaojiadian rock body and is controlled by fault structures. In order to explore the genesis of the Gaojiadian gold deposit, a systematic studies of deposit geology, the chemical composition of gold and gold-bearing pyrite, fluid inclusions, and H-O-S isotopes have been carried out in this paper. The results indicate that the hydrothermal mineralization period of the Gaojiadian gold deposit includes four stages, with stages II and III being the main mineralization stages. Pyrite is the main carrier of gold

\* 本文得到河北科技厅重点研发项目(编号:22374201D)、河北省自然资源厅科研项目(编号:13000024P00F2D410444H)、河北地质矿产勘查开发局科研项目(编号:13000022P0069B410037Y)和河北地质矿产勘查开发局科研项目(编号:13000023P0069B410163U)联合资助  
第一作者简介 杨爱雪,女,1992年生,硕士,工程师,主要从事矿产勘查、火成岩、矿床成因及地质科研工作。Email: 337394871@qq.com  
\*\* 通讯作者 吕水,男,1983年生,硕士,高级工程师,主要从事区域地质调查、矿产勘查及地质科研工作。Email: huheshui@163.com  
收稿日期 2023-12-14;改回日期 2024-01-30。赵海杰编辑。

minerals, gold minerals are divided into natural gold and silver-gold ore, accumulated within pyrite as independent gold minerals. The Fe and S content and Fe/S element ratio of pyrite during the main mineralization stage reveal that the gold deposit has the characteristics of magmatic hydrothermal type. The type of fluid inclusions in the main mineralisation stage is dominated by liquid-rich two-phase H<sub>2</sub>O solution inclusions, followed by CO<sub>2</sub>-containing three-phase inclusions, which are medium-temperature, medium-low-salinity fluids. The  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  values of the fluids in different mineralisation stages range from 1.82‰ to 5.60‰, and the  $\delta\text{D}$  values range from -83.3‰ to -55.3‰, indicating that the fluids are mainly from magma water, with a small amount of atmospheric precipitation mixed in. The  $\delta^{34}\text{S}$  value of pyrite in the main mineralisation stage is 2.40‰~5.61‰, showing the characteristics of mantle sulphur or magma sulphur, revealing that the sulphur of mineralisation material mainly comes from deep magma. The comprehensive study concludes that the multi-phase magmatic intrusion activities of the Gaojiadian rock body provided sufficient heat sources and metallogenic fluids for gold mineralisation, and thus the Gaogadian gold deposit is of magmatic-hydrothermal type.

**Key words:** pyrite, EMPA, fluid inclusions, H-O-S isotopes, Gaojiadian gold deposit, eastern Hebei Province

前人对冀东金矿床地质特征、成矿时代、成矿流体、成矿物质来源、流体性质、成岩成矿作用等进行了大量深入研究,并取得了丰硕成果,认为金成矿与燕山期中酸性侵入岩具有密切的成因关系(烟晓玲等,2019),年代学数据显示叠加成矿作用的时代为燕山早期,是冀东地区金矿的主要成矿期。

冀东地区金矿床(点)多分布于马兰峪复式背斜核部,部分分布于两翼,多在距岩体0~5 km范围内。年代学数据显示成矿时代(154~175 Ma)与燕山期侵入岩(153~200 Ma)同期(李正远等,2014;杨付岭等,2015;邹滔等,2016;陈绍聪等,2019;张岱岳等,2022);成矿流体以岩浆水为主,有少量天水加入,成矿物质来源于深部岩浆,与花岗岩体有关,具有深源和幔源特征;包裹体的主要气体成分是CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>,流体具有弱酸/弱碱性,成矿为还原性环境,属热液矿床(接白,2013;辛存林等,2014;封文学,2017;王卓,2020);对于金成矿温度也有不同的观点,有研究认为金矿的成矿温度为中高温、中温和中低温(贾三石等,2012;2014;辛存林等,2014),燕山期花岗岩体的侵入为金成矿提供了热动力(热源)、成矿流体和部分成矿物质,也为流体的向上运移提供了通道,并萃取了围岩中的金在有利位置沉淀成矿(付宇鹏,2012)。

高家店金矿床是众多金矿床中典型代表,规模达中型,赋存于高家店岩体内。前人对高家店岩体进行了较多研究:高家店岩体为一复式杂岩体,由正长岩、花岗岩和闪长岩3大类主要岩石类型组成,对于岩体的形成时代,尹业长等(2018)测得黑云母闪长岩样品锆石 U-Pb 年龄为 198.8 Ma;杨付岭等

(2015)测得石英闪长岩样品锆石 U-Pb 年龄为 170.5 Ma;作者对高家店岩体的石英正长岩、黑云二长花岗岩、角闪闪长岩样品进行了锆石 U-Pb 定年,其年龄分别为 197.4 Ma、175.8~176.7 Ma、175.3 Ma(作者另文待发表),得出高家店岩体的形成时代为早侏罗世—中侏罗世,进而限定了赋存于高家店岩体内的金矿形成于 175.3 Ma 或其之后。对于岩体的成因,尹业长等(2018)对区域中生代岩体进行地球化学特征研究,认为高家店黑云母闪长岩与区内罗文峪、贾家山、青山口、峪耳崖、蛇盘兔、牛心山等岩体具有相似的特征,岩石类型为 I-A 过渡型高钾钙碱性系列花岗岩,岩浆来源于地壳,形成于后碰撞环境。而对于赋存其内的高家店金矿的成矿流体性质、成矿流体及成矿物质来源等未进行过研究。

鉴于此,作者在对高家店金矿床野外地质调查和认真观察矿体特征的基础上,采集了有代表性的原生矿石样品,进行金及载金黄铁矿电子探针、流体包裹体岩相学、均一温度、盐度测试、稳定同位素分析,探讨金的赋存状态及矿床成因,填补高家店金矿床数据空白,以期对认识区内同类型金矿的矿床成因、总结成矿规律及找矿方向研究提供借鉴。

## 1 区域地质概况

冀东地区位于华北克拉通北缘燕山造山带东部,从太古宙至中生代经历了多期次复杂构造演化和岩浆侵入活动,成矿作用强烈,是中国重要的金矿床产地(图1)。EW向的马兰峪复式背斜和EW、NE、NNE和NW向等多组断裂构造构成了本区基本

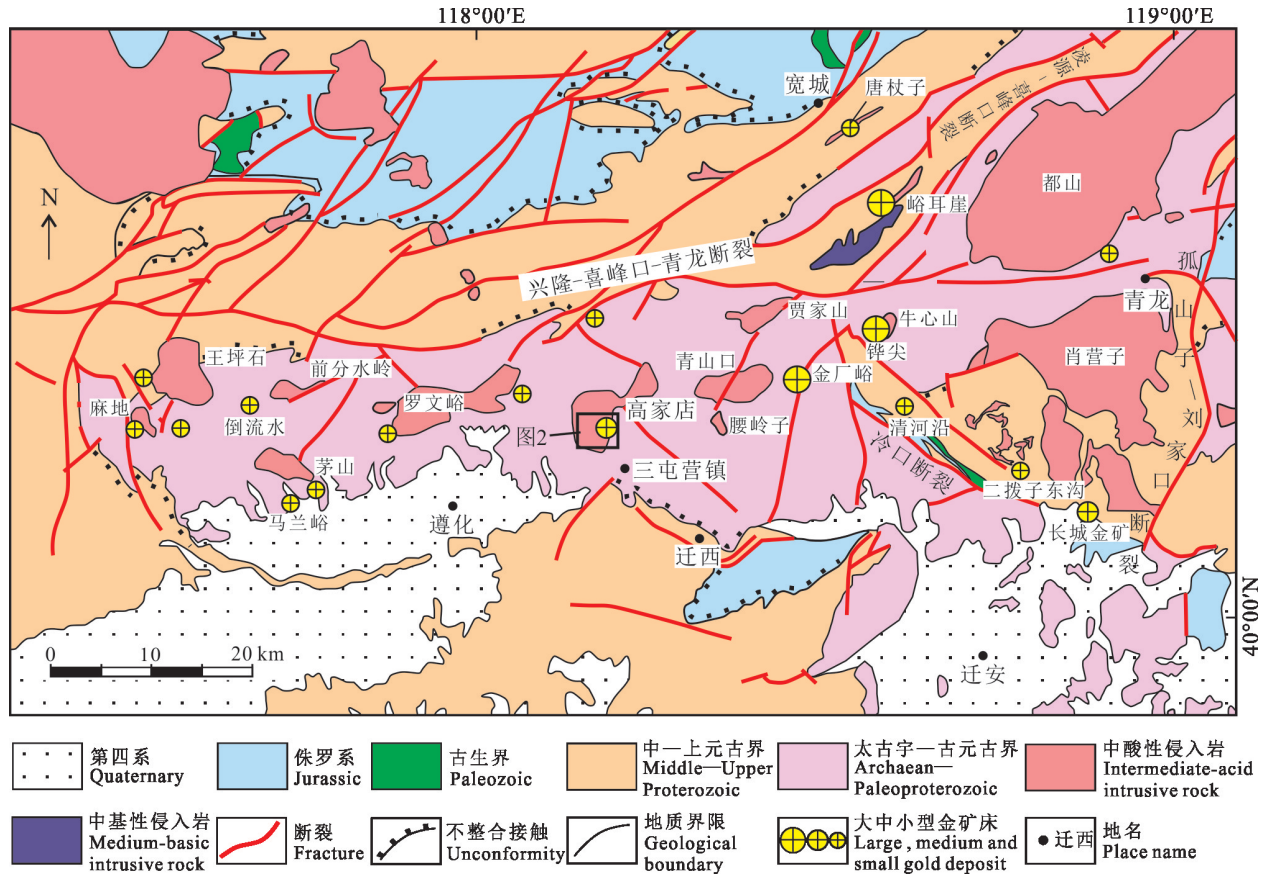


图1 冀东地区地质简图(据 Song et al., 2016; 杨爱雪等, 2021 修编)

Fig. 1 Geological sketch map of eastern Hebei Province (modified from Song et al., 2016; Yang et al., 2021)

构造格架。复式背斜核部出露的地层主要为太古宙—古元古代变质岩和同时代的深成岩(TTG岩套),也是本区的结晶基底;南北两翼为与基底呈不整合接触的中上元古代—古生代沉积盖层(缺志留系—泥盆系);中生代火山岩和火山碎屑沉积岩主要分布于中生代断陷盆地中(杨爱雪等, 2021)。区内岩浆活动频繁,具有多阶段、多期次活动的特点,以中生代侵入活动最为强烈,包括印支期和燕山期,燕山期达到顶峰,形成了都山、峪耳崖、肖营子、牛心山、青山口、高家店、罗文峪、茅山等花岗岩体(罗镇宽等, 2003; 杨付领等, 2015; 杨爱雪等, 2016; 尹业长等, 2018),侵位于马兰峪复式背斜核部太古宙结晶基底内,呈EW向串珠状分布,单个岩体呈NE向长SW向短的长轴状特征。在中生代岩浆侵入活动的同时也经历大规模的金成矿作用,金矿多分布于燕山期花岗岩体内部、或与围岩的内外接触带或围岩变质岩中,与燕山期侵入活动关系最为密切,受EW、NE和NNE向断裂构造控制明显。

## 2 矿床地质特征

高家店金矿床位于河北省唐山市迁西县三屯营镇境内,构造位置上位于马兰峪复式背斜核部。高家店金矿床分布于高家店岩体内,包括3个金矿段,分别为高家店金矿段、麻家峪金矿段和靴脱崖金矿段,其中高家店金矿段和麻家峪金矿段拥有多年的采矿活动历史。靴脱崖金矿为河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队于2014年通过1:1万土壤地球化学测量在麻家峪金矿区西侧发现有金异常存在,并进行了钻探验证了金矿体的存在,由于该处位于靴脱崖村附近,故命名为靴脱崖金矿。因靴脱崖金矿与高家店金矿段和麻家峪金矿段均赋存于高家店岩体内,且具有相同的矿石类型,推测也应具有相同的矿床成因,因此将靴脱崖金矿归属于高家店金矿床的一个矿段(图2)。

### 2.1 矿区地质

矿区内及周边出露的地层主要为太古界迁西群

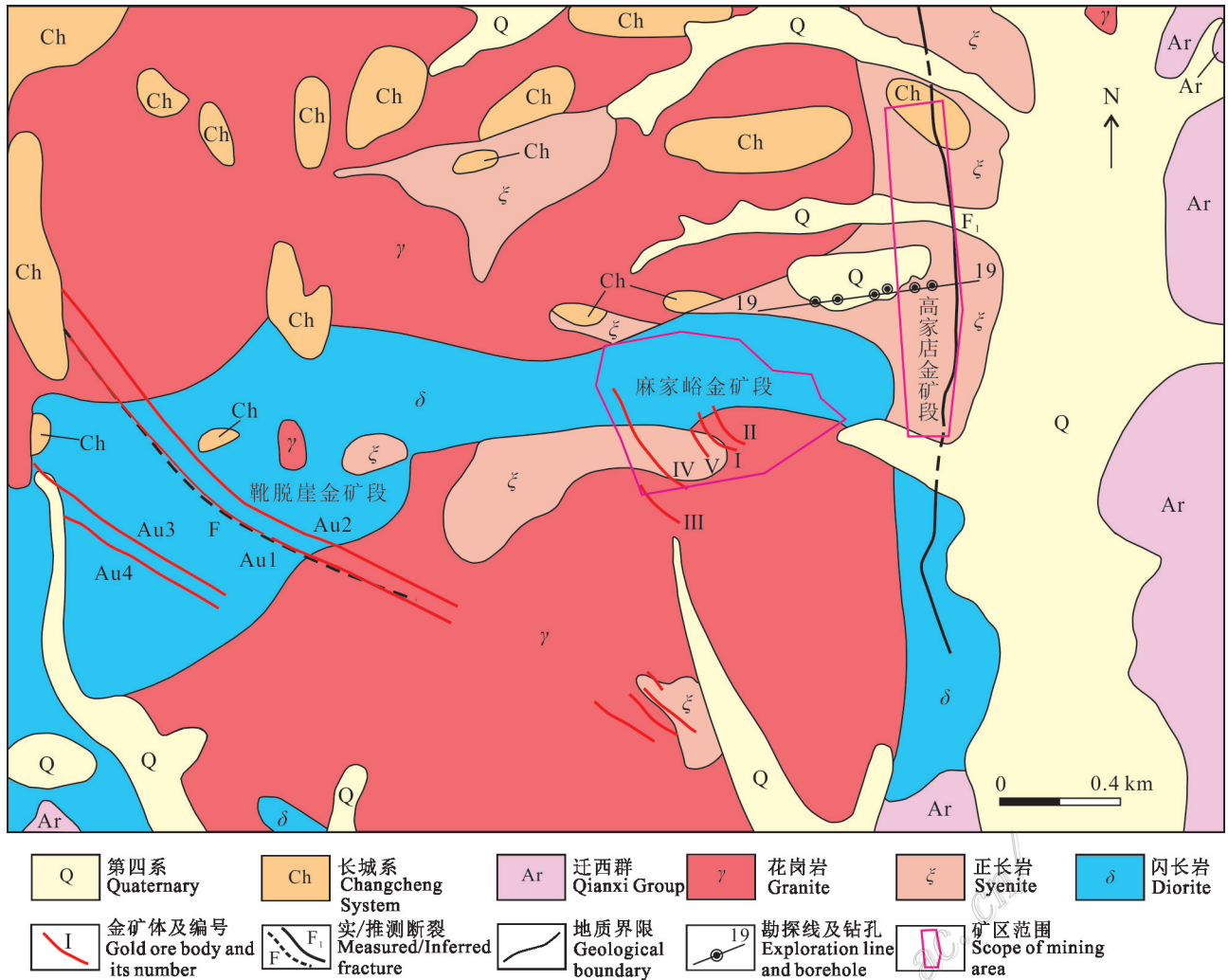


图2 高家店金矿床矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Gaojiadian gold deposit

三屯营组和第四系,长城系呈捕虏体形态零星出露,岩性包括石英砂岩和白云岩等。区内构造以断裂构造为主,发育NW、NE、近SN向多组断裂构造,尤以NW、近SN向断裂最为发育。近SN向断裂以区内东部的F<sub>1</sub>为主,为本区的主要断裂构造,贯穿高家店金矿段,倾向W,倾角45°~55°,产状较稳定,走向长1650 m,宽5~20 m,延伸大于950 m。断裂带中岩性以断层泥、糜棱岩、角砾岩及碎裂岩为主,局部填充有石英脉,走向或倾向上具有明显的膨胀收缩现象,为高家店金矿段的主要导矿和储矿构造。NW向断裂在麻家峪和靴脱崖一带较为发育,走向300°~320°,倾向NE,倾角25°~30°,在靴脱崖一带倾角较陡,多在40°~55°,长150~4000 m,宽一般0.30~2.00 m,为压扭性正断层,断层内被压碎蚀变岩、断层泥充填,为麻

家峪和靴脱崖金矿段的主要控矿和储矿构造。

区内岩浆岩为高家店岩体,呈岩基状侵入于太古宙太古界迁西群三屯营组内,主要包括正长岩类、花岗岩类、闪长岩类3种岩石类型及其间的过渡类型。

## 2.2 矿体及矿石特征

高家店金矿床包括高家店金矿段、麻家峪金矿段和靴脱崖金矿段,现矿体特征分述如下:

高家店金矿段矿体赋存在F<sub>1</sub>断裂带及其蚀变带中,产状受断裂控制,走向近SN,倾向W,倾角46°~50°。以F<sub>1</sub>断层为界分为I、II两个矿体群,F<sub>1</sub>上盘为I矿体群,下盘为II矿体群(图3),且I矿体群规模大于II矿体群,矿体多分布于F<sub>1</sub>断层上盘。矿体形状多呈透镜状、似层状、舒缓波状。其中I矿体群

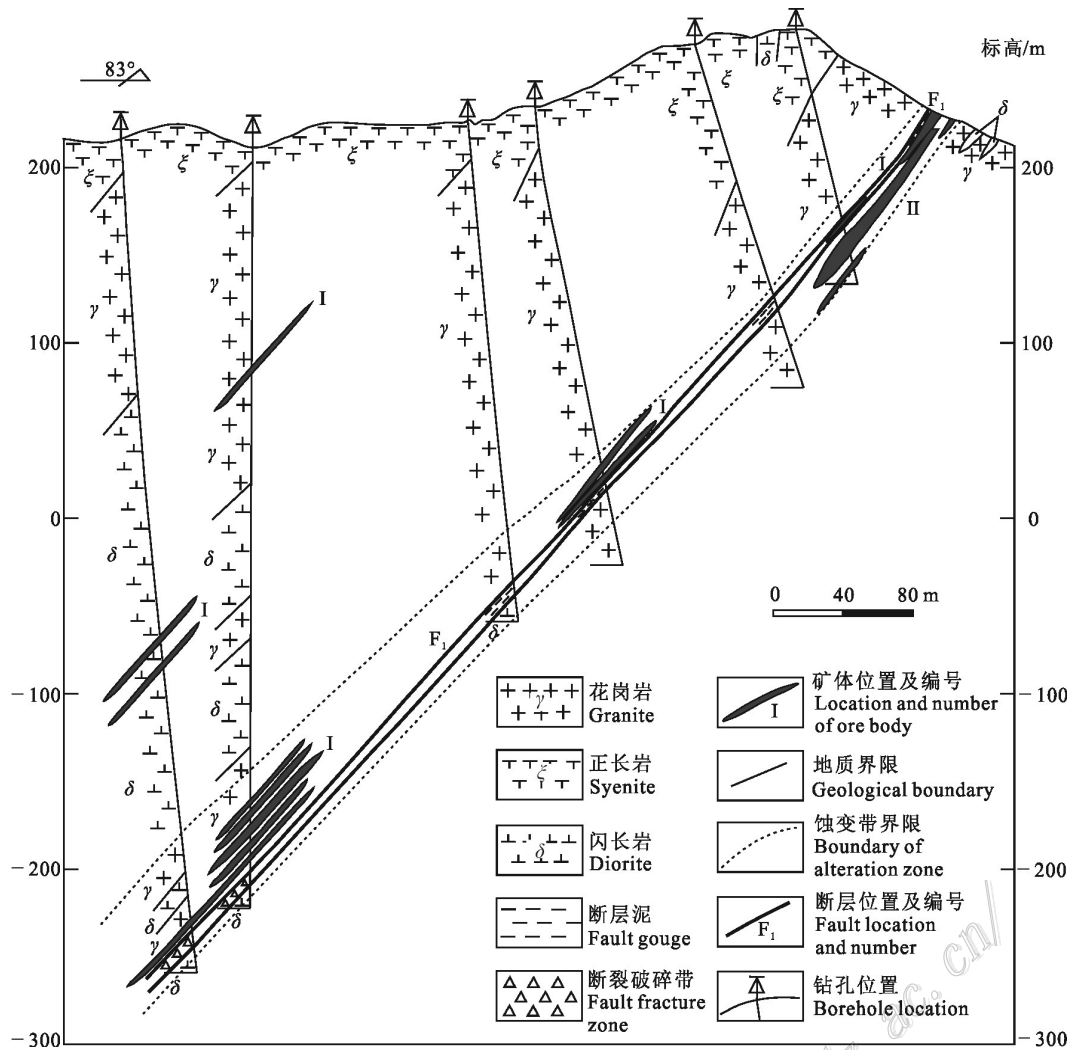


图3 高家店金矿段19号勘探线地质剖面图

Fig. 3 Geological profile along No. 19 exploration line of the Gaojiadian mine section

矿化带长约990 m,矿体赋存标高为193~470 m,产状同F<sub>1</sub>断层,平均厚度3.07 m,Au平均品位为3.38×10<sup>-6</sup>。II矿体群矿化带长约820 m,矿体赋存标高为229~-91.8 m,产状同F<sub>1</sub>断层,平均厚度4.24 m,Au平均品位为1.93×10<sup>-6</sup>。

麻家峪金矿段矿体赋存于NW向断裂带中,产状受断裂控制。矿区范围内自内带往外带,依次分布有II、I、V、IV、III号5条矿脉,包括17个矿体,其中工业矿体12个,倾向北东(50°~55°),倾角25°~30°,局部较陡,倾角40°~50°,矿脉长度多在50~200 m之间。IV-1矿体为主要矿体,控制的最低标高为-7 m,具有上陡下缓的特征,地表出露长度420 m,倾斜延深长350 m,矿体最大厚度2.02 m,最小厚度0.51 m,平均厚度0.72 m;Au最高品位19.08×10<sup>-6</sup>,最低品位

1.63×10<sup>-6</sup>,平均品位4.31×10<sup>-6</sup>,深部矿化程度较好于地表。

靴脱崖金矿段矿体赋存于NW向断裂带中,产状受断裂控制。在工作区内共发现数条大小不等的金矿(化)体,厚度均较小,产状变化不大,其中Au1、Au2、Au3、Au4号矿(化)体为主要的矿(化)体,平行分布,走向310°,倾向北东,倾角约45°,呈细脉、网脉、浸染状。Au1矿化体推测断续出露长度约2500 m,矿化体厚度0.15~5.75 m,Au品位(0.65~9.27)×10<sup>-6</sup>;Au2矿体分布在Au1的北东侧,推测矿体断续出露长度约2500 m,矿体厚度0.15~4.10 m,Au品位(0.78~8.28)×10<sup>-6</sup>;Au3、Au4号矿体处于民采揭露状态,分布于Au1矿化体南西方向300 m处,断续出露长度约800 m,矿体厚度0.80~1.30 m,Au品位

$(1.25\sim 12.03)\times 10^{-6}$ 。

高家店金矿床矿石的矿物组成比较简单,金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和极少量的金矿物等(图4a~f)。脉石矿物以石英、斜长石为主,其次为钾长石、碳酸盐、绢云母、高岭土等。矿石构造主要为网脉状、细脉状(图4a)、浸染状构造(图4b、c)。矿石结构主要有自形(图4d)、半自形-他形粒状结构(图4e、f)、交代结构、交代残余结构、包含结构(图4f)。

根据矿体的形态、产状、矿物成分、结构构造及围岩蚀变等特点,高家店金矿矿石可分为2种自然类型,为石英脉型(图4a)和蚀变岩型(图4b、c),以蚀变岩型为主。

花岗岩类、闪长岩类为金矿的主要赋矿围岩,矿体围岩蚀变较强,总体表现为距离矿体越近,蚀变越强,围岩蚀变类型主要有硅化、绢英岩化、黄铁矿化、钾化(图4g、h),局部高岭土化、碳酸盐化、绿帘石化、绿泥石化等,与金成矿关系最为密切的是硅化、绢英岩化、黄铁矿化和钾化。在石英脉与花岗岩和闪长岩接触处硅化、绢英岩化、黄铁矿化尤为强烈,多见石英呈细脉状、网脉状在花岗岩和闪长岩内分布,此外还可见石英细脉和钾化脉在花岗岩内相伴产出。

### 2.3 成矿阶段划分

在野外实际观察矿脉之间穿插关系的基础上,结合室内显微镜,笔者将高家店金矿床成矿作用分为热液期和表生期。其中热液期包括4个阶段,分别为乳白色石英阶段(图5a、b)、石英-黄铁矿阶段(图5c、d)、石英-多金属硫化物阶段(图5e、f)、碳酸盐阶段(图5g、h),各阶段特征如下:

第Ⅰ阶段(乳白色石英阶段):该成矿阶段属于金成矿的开始阶段或金成矿的早期阶段,常见于矿脉或矿体的边部,形成大规模石英脉,主要矿物为乳白色石英(图5a)和零星分布的粗粒立方体黄铁矿(图5b)。肉眼观察石英较为纯净,透明度好,块状或粗粒状,有时呈梳状构造,受构造应力作用破碎现象明显。这一阶段中的黄铁矿也普遍具有压碎结构,含金性较差。

第Ⅱ阶段(石英-黄铁矿阶段):该阶段是成矿的主要阶段,石英的主要变化是颜色变为灰白色、烟灰色(图5c),透明度较差。石英的烟灰色主要是由于其含有细粒分散状黄铁矿等硫化物微粒所致,颜色越深黄铁矿含量越高。呈灰白色、烟灰色的石英与黄铁矿发育在较为碎裂的蚀变花岗岩和闪长岩裂隙

中,黄铁矿含量较前一阶段明显增多,颗粒明显变细,常呈浸染状分布,局部呈团簇状。手标本常可见到这一阶段的硫化物矿物集合体呈脉状直接穿插于第一阶段石英脉中。该阶段硫化物种类主要为黄铁矿,黄铜矿含量极少,可见金矿物(图5d),该阶段矿石金含量较高。

第Ⅲ阶段(石英-多金属硫化物阶段):该阶段是成矿的最主要阶段,黄铁矿相对第二阶段含量增加,颜色变得更黄,为暗铜黄色(图5e),反射率相对第二阶段明显变低,石英含量相对减少。另外,这一阶段其他硫化物含量明显增多,主要金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、金矿物(图5f)等。石英-多金属硫化物发育在较为碎裂的蚀变花岗岩和闪长岩裂隙中,多金属硫化物常常呈细脉状、网脉状或浸染状分布,该阶段矿石金含量高。

第Ⅳ阶段(碳酸盐阶段):该阶段为成矿后期阶段,明显特征为出现大量碳酸盐矿物(图5g),呈脉状充填于早期裂隙中(图5h),另含有少量的石英和黄铁矿。

其中第Ⅱ阶段(石英-黄铁矿阶段)和第Ⅲ阶段(石英-多金属硫化物阶段)为金成矿的主要阶段。

表生期特征:表生期为矿体被暴露到地表或接近地表后遭受强氧化及风化剥蚀形成的矿体(或矿化体)。主要矿物为褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿。其中褐铁矿为黄铁矿经氧化淋滤形成,且可见褐铁矿,呈黄铁矿假象。这一阶段金矿物被淋滤掉或下渗至次生富集带。

## 3 样品与实验测试方法

本次采集了不同成矿阶段不同矿石类型的新鲜原生矿石样品,在野外观察和室内矿相学研究基础上,挑选了12件主成矿阶段的样品进行电子探针成分分析,其中26点为主要载金矿物黄铁矿,4点为金矿物;挑选11件主成矿阶段的矿石样品磨制厚约0.3 mm的两面抛光的包裹体片,用于包裹体岩相学观察、显微测温;挑选不同成矿阶段21件矿石样品的石英单矿物,进行H-O同位素组成分析;挑选主成矿阶段的黄铁矿,进行LA-MC-ICP-MS原位S同位素组成分析。

电子探针测试在河北省区调地质勘查有限公司完成,仪器型号为JEOL EPMA8230,测试加速电压为15 kV,束流为20 nA,束斑直径为5  $\mu\text{m}$ ,检出限为

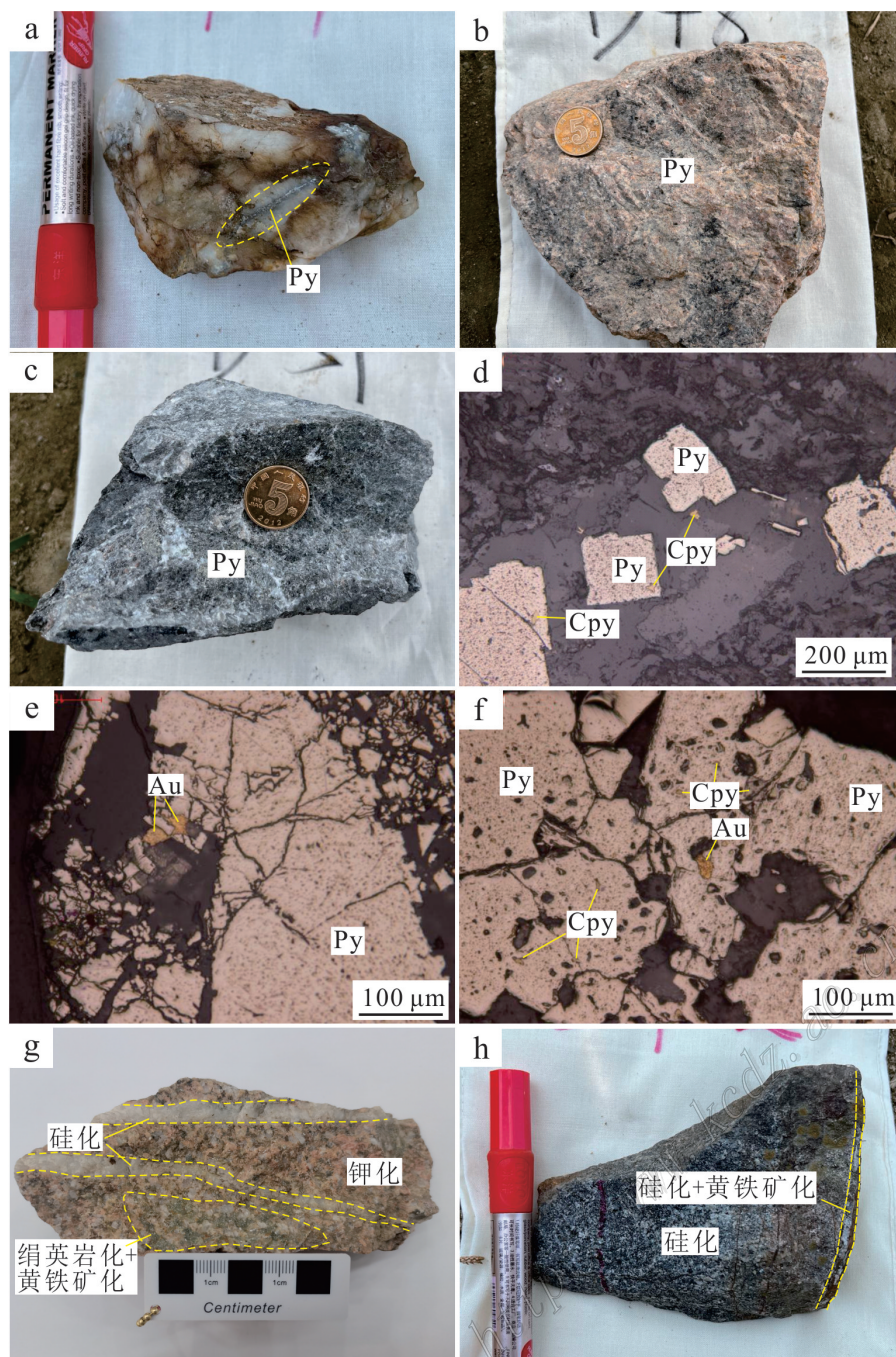


图4 高家店金矿床矿石及围岩蚀变特征

a. 石英脉型金矿石, 黄铁矿呈细脉状分布于石英内; b. 蚀变花岗岩型金矿石, 黄铁矿呈浸染状分布于花岗岩内; c. 蚀变闪长岩型金矿石, 黄铁矿呈浸染状分布于闪长岩内; d. 自形黄铁矿(单偏光); e. 金分布在半自形-他形黄铁矿粒间(单偏光); f. 金分布在半自形-他形黄铁矿内(单偏光); g, h. 围岩为花岗岩和闪长岩的围岩蚀变类型  
Py—黄铁矿; Cpy—黄铜矿; Au—自然金

Fig. 4 Characteristics of ore and surrounding rock alteration in the Gaojiadian gold deposit

a. Quartz vein-type gold ore, pyrite is distributed in the quartz as vein-shape; b. Altered granite-type gold ore, pyrite is distributed in the granite as disseminated; c. Altered diorite-type gold ore, pyrite is distributed in the diorite as disseminated; d. Euhedral pyrite (Unipolar light); e. Gold is distributed between subhedral-anhedral pyrite particles (Unipolar light); f. Gold is distributed within subhedral-anhedral pyrite (Unipolar light); g, h. The surrounding rock is a type of alteration of granite and diorite  
Py—Pyrite; Cpy—Chalcopyrite; Au—Native gold

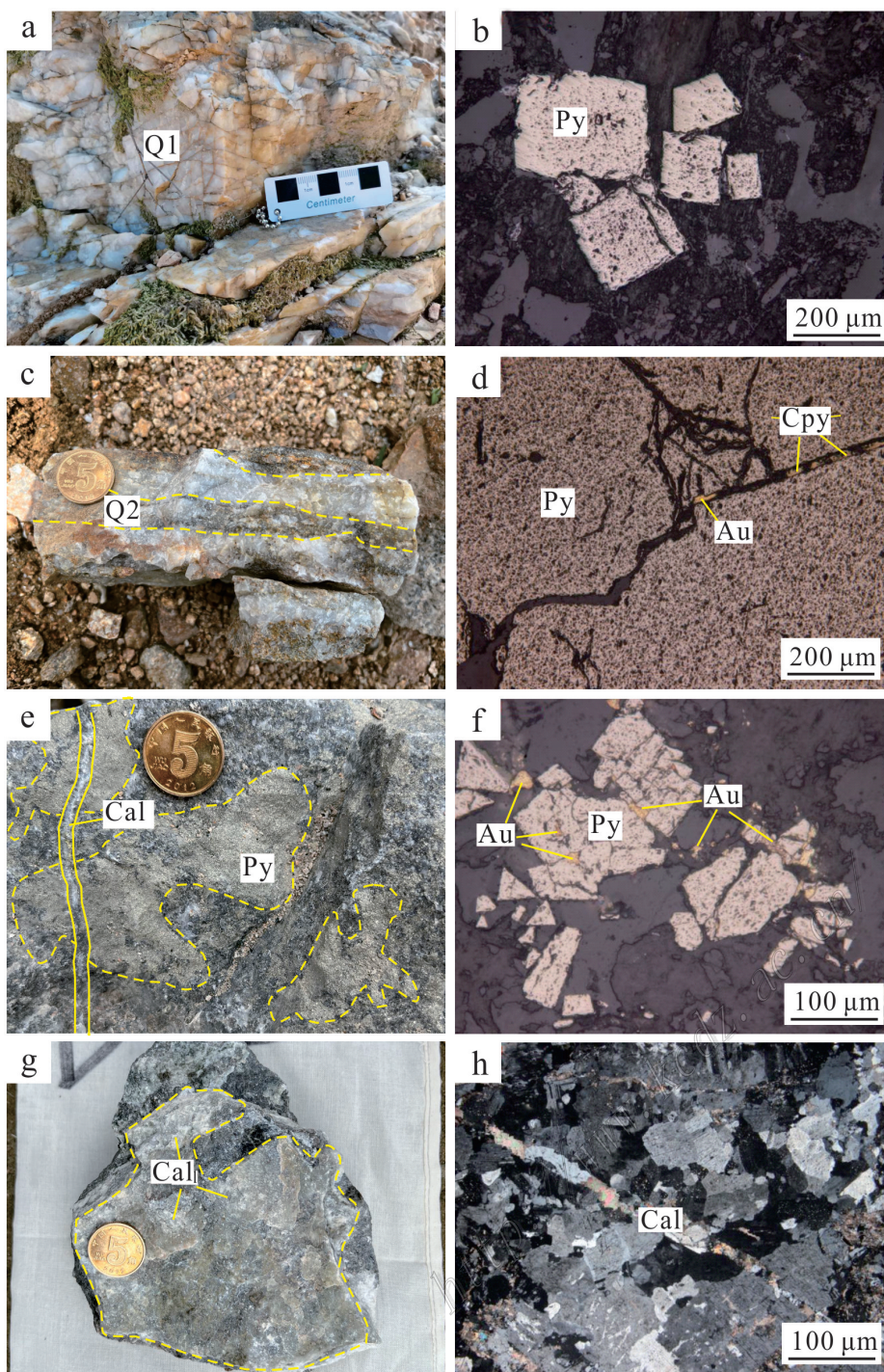


图 5 高家店金矿床不同成矿阶段野外和镜下照片

a, b. I 阶段石英和零星分布的立方体黄铁矿; c, d. II 阶段石英和金的赋存状态;  
 e, f. III 阶段黄铁矿呈浸染状分布于强绢英岩化蚀变岩内和金的赋存状态; g, h. IV 阶段碳酸盐脉(方解石脉)  
 b, d, f 为单偏光, h 为正交偏光; Q1, Q2—I、II 阶段石英; Py—黄铁矿; Cpy—黄铜矿; Au—自然金

Fig. 5 Field and microscopic photos of different mineralization stages in the Gaojiadian gold deposit

a, b. Stage I quartz and scattered cubic pyrite; c, d. Stage II quartz and the occurrence state of gold; e, f. Stage III pyrite is distributed in strong sericite-quartzite altered rock as disseminated, and the occurrence state of gold; g, h. Stage IV carbonate veins (calcite veins)

The b, d, f under the plane-polarized light and the h under the crossed polarized light; Q1, Q2—Stage I, II quartz;

Py—Pyrite; Cpy—Chalcopyrite; Au—Native gold



$100 \times 10^{-6}$ , 采用美国 SPI 矿物标样。首先, 磨制探针薄片; 然后, 在矿相显微镜下圈定待测试的矿物点位; 之后, 对探针薄片进行喷碳处理; 最后, 利用电子探针显微分析仪进行测试。

流体包裹体的包体片磨制与测温工作在河北省区调地质勘查有限公司完成。测试仪器、条件及测试方法详见参考文献(王建青等, 2022)。

本次石英单矿物的挑选工作在河北省区调地质勘查有限公司完成。石英的 H-O 同位素分析测试在北京皓年领航科技有限公司完成。检测仪器及型号为稳定气体同位素质谱仪/253plus。氢同位素和氧同位素分析方法详见参考文献(Clayton et al., 1963; 王建青等, 2022; 龚红胜等, 2022)

LA-MC-ICP-MS 原位 S 同位素组成分析测试在北京皓年领航科技有限公司完成。所用仪器为 Thermo Scientific 公司生产的 Neptune Plus 多接收等离子体质谱仪和与之连用的 RESOLUTION SE 193 nm 固体激光器。根据样品扫描后的照片选择合适区域, 利用激光剥蚀系统对硫化物进行剥蚀。剥蚀采用点剥蚀, 剥蚀直径在 16~100  $\mu\text{m}$  之间可调, 能量密度通常设为 7~8  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 频率为 6~8 Hz。正式测试前, 以硫化物标样 balmat FeS、MXG 和 balmat ZnS 对仪器参数进行调试, 使之达到最佳状态。为减小基质效应对测试结果的影响, 分析过程中分别用与样品基质相似的硫化物为标样, 并用标准-样品-标准交叉法进行质量歧视校正。

## 4 实验测试结果

### 4.1 电子探针结果

高家店金矿床主成矿阶段黄铁矿和金矿物电子探针测试结果见表 1、表 2。

黄铁矿中  $w(\text{Fe})=45.69\% \sim 46.76\%$ , 平均值为 46.33%,  $w(\text{S})=52.92\% \sim 54.37\%$ , 平均值为 53.55%(表 6-1); S/Fe 元素含量比介于 1.14~1.19, 平均值为 1.16; S/Fe 原子个数比介于 1.98~2.07, 平均值为 2.01; 化学式  $\text{FeS}_{1.98} \sim \text{FeS}_{2.07}$ , 平均化学式为  $\text{FeS}_{2.01}$ , 与黄铁矿的理论值  $w(\text{S})$  和  $w(\text{Fe})$  分别为 53.45% 和 46.55%, S/Fe(原子比)=2 基本一致;  $w(\text{Cu})=0.004\% \sim 0.045\%$ , 平均值 0.019%;  $w(\text{Zn})=0.001\% \sim 0.034\%$ , 平均值 0.016%;  $w(\text{As})=0.007\% \sim 0.036\%$ , 平均值 0.024%;  $w(\text{Sb})=0.004\% \sim 0.017\%$ , 平均值 0.010%;  $w(\text{Au})=0.002\% \sim 0.050\%$ , 平均值 0.020%;  $w(\text{Ag})=0.002\% \sim$

$0.006\%$ , 平均值 0.004%;  $w(\text{Co})=0.009\% \sim 0.196\%$ , 平均值 0.076%;  $w(\text{Ni})=0.001\% \sim 0.022\%$ , 平均值 0.011%;  $w(\text{Te})=0.001\% \sim 0.033\%$ , 平均值 0.011%。

金矿物的  $w(\text{Au})=65.153\% \sim 85.367\%$ , 平均值 76.503%;  $w(\text{Ag})=12.479\% \sim 32.713\%$ , 平均值 21.285%;  $w(\text{S})=0.093\% \sim 0.192\%$ , 平均值 0.131%;  $w(\text{Fe})=0.234\% \sim 0.514\%$ , 平均值 0.373%;  $w(\text{Co})=0.051\% \sim 0.154\%$ , 平均值 0.089%;  $w(\text{Ni})=0.003\% \sim 0.042\%$ , 平均值 0.018%;  $w(\text{Cu})=0.009\% \sim 0.029\%$ ;  $w(\text{Zn})=0.002\% \sim 0.017\%$ ;  $w(\text{As})=0.003\% \sim 0.019\%$ ;  $w(\text{Te})=0.060\% \sim 0.292\%$ , 平均值 0.171%。

### 4.2 流体包裹体岩相学

显微镜下观察, 主成矿阶段石英中流体包裹体普遍发育, 包裹体与寄主矿物的界限明显, 透明度一般。其中, 次生包裹体为主, 原生包裹体次之。根据室温下的相态和包裹体成分, 将高家店金矿石英流体包裹体主要分为以下 2 个类型:

I 型包裹体- $\text{H}_2\text{O}$  溶液包裹体(两相, 图 6a~d), 该类型包裹体普遍发育, 大小一般为 3~10  $\mu\text{m}$ , 气相分数一般在 5%~25% 之间, 形态以不规则状为主, 部分呈长条形、椭圆形, 少数呈三角形、菱形, 多单独成行产出, 少数呈孤立状分布。

II 型包裹体-含  $\text{CO}_2$  包裹体(三相, 图 6e、f), 该类型包裹体发育一般, 大小一般为 3~9  $\mu\text{m}$ , 气相分数在 5%~20% 之间, 形态主呈不规则状, 少数呈椭圆形、三角形、长条形等, 与  $\text{H}_2\text{O}$  溶液包裹体一起, 单独成行产出。

另见少量纯气相包裹体与纯液包裹体, 其中纯气相包裹体在镜下呈黑色。

### 4.3 流体包裹体均一温度、盐度

主成矿阶段流体包裹体的测温结果见表 3, 盐度是利用 MacFlincon 计算机程序算得。均一温度和盐度直方图见图 7a、b。测试结果显示, 132 个流体包裹体的均一温度为 202~322 $^{\circ}\text{C}$ , 均值为 264.5 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 1.82%~12.29%, 均值为 7.06%。

其中 105 个 I 型包裹体加热后均一至液相, 均一温度为 201.7~322.2 $^{\circ}\text{C}$ , 主要集中在 240~260 $^{\circ}\text{C}$ (图 7a), 冰点温度为 -8.5~-1.1 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 1.82%~12.29%, 主要集中在 8%~10%(图 7b)。

27 个 II 型包裹体均一至液相水, 部分均一为液相  $\text{CO}_2$ , 均一温度为 228.3~321.1 $^{\circ}\text{C}$ , 主要集中在 260~280 $^{\circ}\text{C}$ , 笼形物消失温度为 5.5~9 $^{\circ}\text{C}$ , 部分均一温度为

表 1 高家店金矿床黄铁矿电子探针主、微量元素测试结果表

Table 1 EPMA major and trace element test results of pyrite from the Gaojiadian gold deposit

样品编号	w(B)/%														Fe/S
	Fe	S	Au	Ag	Co	Ni	Cu	As	Zn	Te	Sb	Bi	Pb	总和	
D09-4-Py-1	45.957	53.446	0.041	0	0	0	0	0.007	0.04	0	0	0	0	99.491	0.86
D09-4-Py-2	46.342	53.211	0.032	0	0.196	0.011	0.008	0	0.034	0.002	0.01	0	0	99.846	0.87
D25-Py-1	46.388	53.113	0.025	0	0.062	0	0.01	0.036	0	0	0	0	0	99.634	0.87
D25-Py-2	46.458	53.557	0	0	0	0.016	0.004	0	0	0	0	0	0	100.035	0.87
D26-2-Py-1	46.439	53.765	0	0	0	0	0.018	0	0	0.004	0	0	0	100.226	0.86
D26-2-Py-2	46.247	53.432	0.05	0	0	0	0.01	0	0.001	0.004	0	0	0	99.744	0.87
D47-Py-1	45.691	54.369	0	0	0.044	0	0	0	0.011	0.002	0.004	0	0	100.121	0.84
D47-Py-2	46.373	53.273	0	0.002	0	0.001	0	0	0	0.014	0	0	0	99.663	0.87
D47-Py-3	45.831	53.14	0.027	0	0.097	0	0	0	0	0.027	0.013	0	0	99.135	0.86
D48-Py-1	46.287	53.72	0	0	0	0	0.045	0	0	0	0	0	0	100.052	0.86
D48-Py-2	46.254	53.544	0.007	0.003	0.013	0.016	0	0	0.024	0	0	0	0	99.861	0.86
D48-Py-3	46.31	53.6	0.01	0	0.009	0.013	0	0	0	0.008	0	0	0	99.95	0.86
D49-Py-1	46.547	53.676	0.038	0	0	0	0.017	0	0	0.007	0.017	0	0	100.302	0.87
D49-Py-2	46.649	53.422	0.002	0	0.071	0	0	0	0	0.001	0	0	0	100.145	0.87
D59-Py-1	46.763	53.6	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.365	0.87
D59-Py-2	46.472	52.924	0.016	0	0	0	0	0	0.021	0	0	0	0	99.433	0.88
D59-Py-3	46.336	54.16	0.01	0	0	0.022	0	0	0.029	0.033	0.006	0	0	100.596	0.86
D68-Py-1	46.281	53.074	0	0	0.044	0	0	0.029	0	0	0	0	0	99.428	0.87
D68-Py-2	46.578	53.523	0.015	0	0.164	0.01	0	0.024	0.004	0	0	0	0	100.318	0.87
D68-Py-3	46.24	53.54	0.012	0	0.084	0	0.017	0	0	0.009	0.011	0	0	99.913	0.86
D91-Py-1	46.694	53.479	0.004	0	0	0	0	0	0	0.013	0	0	0	100.19	0.87
D71-Py-1	46.501	53.071	0.022	0.006	0.049	0	0	0	0.003	0	0.007	0	0	99.659	0.88
D71-Py-2	45.882	54.267	0.014	0	0	0	0.018	0	0.021	0.019	0	0	0	100.221	0.85
D77-Py-1	46.232	53.271	0.022	0.003	0	0.001	0.039	0	0.015	0	0	0	0	99.583	0.87
D77-Py-2	46.708	53.878	0.022	0.004	0	0.006	0.021	0	0	0	0	0	0	100.639	0.87
D90-Py-1	46.06	54.257	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.347	0.85

表 2 高家店金矿床金矿物电子探针主、微量元素测试结果表

Table 2 EPMA major and trace element test results of gold minerals from the Gaojiadian gold deposit

样品编号	w(B)/%														总数
	Fe	S	Au	Ag	Co	Ni	Cu	As	Zn	Te	Sb	Bi	Pb		
D09-4-Elc-1	0.514	0.093	65.153	32.713	0	0	0	0	0	0.292	0	0	0	98.765	
D49-Elc-1	0.338	0.115	85.367	12.479	0.063	0.003	0	0	0.002	0.06	0	0	0	98.427	
D59-Elc-1	0.405	0.192	73.231	24.136	0.051	0.042	0.029	0.019	0.017	0.16	0	0	0	98.282	
D91-Elc-1	0.234	0.124	82.262	15.813	0.154	0.008	0.009	0.003	0	0	0	0	0	98.607	

28~30.9°C, 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 2.00%~8.19%, 主要集中在 4%~6%。

相对于 II 型包裹体, I 型包裹体表现为略低的均一温度和较高的盐度。

#### 4.4 H-O 同位素组成

H-O 同位素组成测试结果及  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  计算结果见

表 4。高家店金矿床不同成矿阶段石英中  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  介于 10.12‰~13.90‰, 平均值 12.07‰;  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  介于 -83.3‰~-55.3‰, 平均值 -70.74‰。其中 I 阶段的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  为 10.96~12.24,  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  为 -63.7‰~-61.6‰; II 阶段的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  为 10.11~12.48,  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  为 -73.4~-55.3; III 阶段的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  为

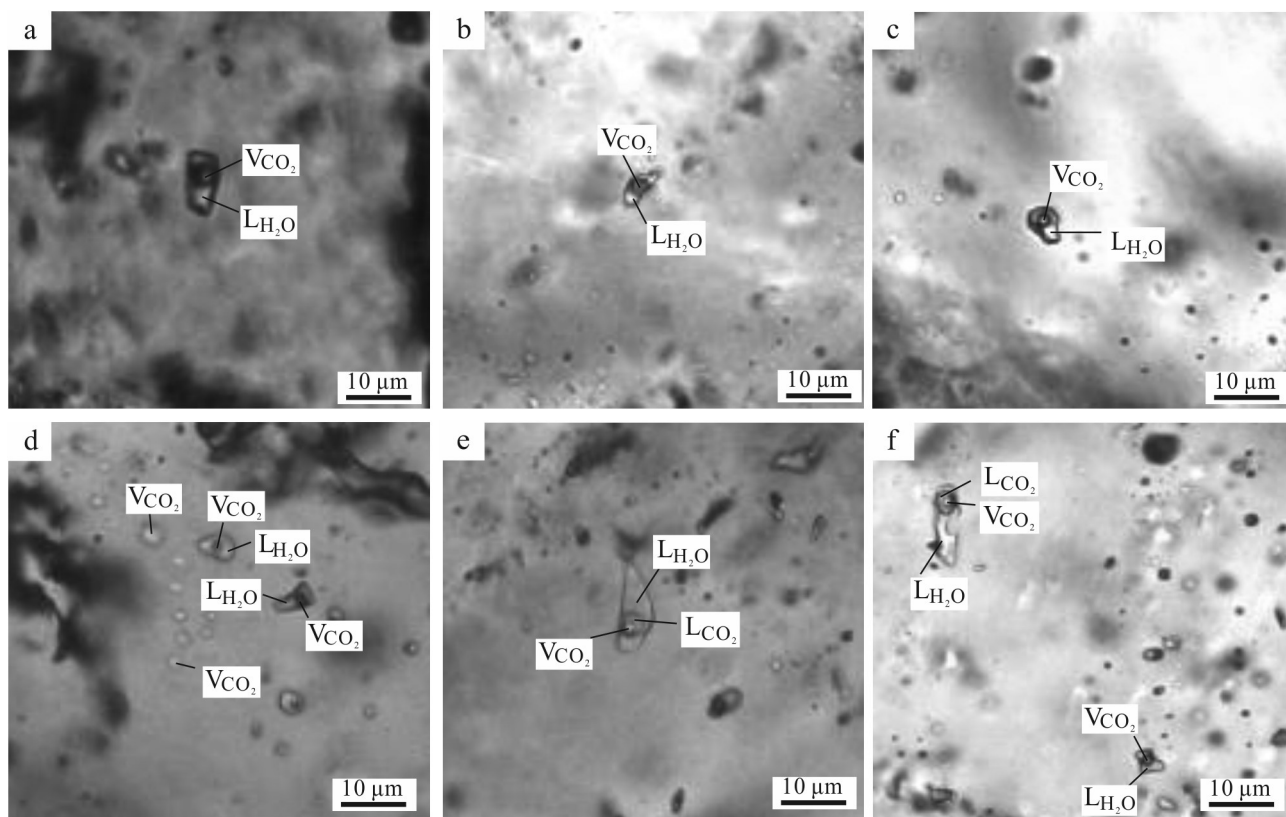


图6 高家店金矿床主成矿阶段流体包裹体特征

a~d. 石英中I型H<sub>2</sub>O溶液包裹体; e, f. 石英中II型含CO<sub>2</sub>包裹体

L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—液相H<sub>2</sub>O; L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—液相C<sub>2</sub>O; V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—气相CO<sub>2</sub>

Fig. 6 Characteristics of fluid inclusions in the main mineralization stage of the Gaojiadian gold deposit

a~d. Type I H<sub>2</sub>O solution inclusions in quartz; e, f. Type II CO<sub>2</sub> containing inclusions in quartz

L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—Liquid phase water; L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—Liquid phase carbon dioxide; V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—Gaseous carbon dioxide

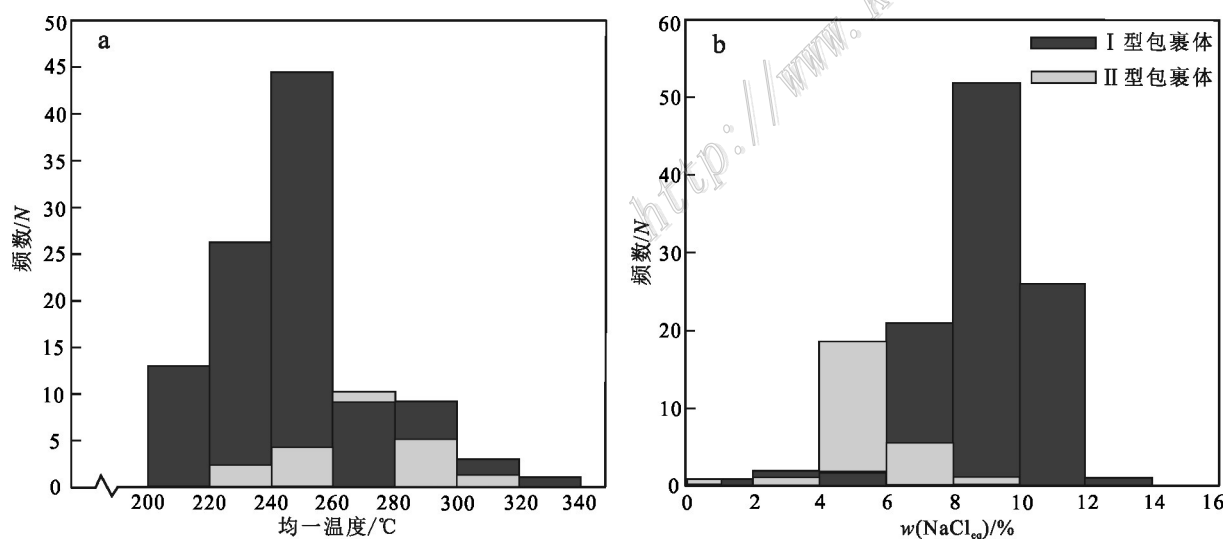


图7 高家店金矿床流体包裹体均一温度(a)和盐度直方图(b)

Fig. 7 Histogram of uniform temperatures (a) and salinities (b) of fluid inclusions in the Gaojiadian gold deposit

表3 高家店金矿床流体包裹体温度测试结果

Table 3 Temperature test results of fluid inclusions in the Gaojiadian gold deposit

样品号	包裹体类型	初溶温度/°C	笼形物消失温度/°C	部分均一温度/°C	完全均一温度/°C	冰点温度/°C	w(NaCl <sub>eq</sub> )/%	数量/个
D09-4	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				213.8~322.2	-7~-1.5	2.47~10.48	11
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-59.1~-58.1	5.5~7.9	28~30.5	257~278.1		4.07~8.19	4
D09-8	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				226.4~316.9	-7.4~-2.6	4.23~10.98	9
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58~-57.5	6.9~7.9	28.6~30.8	270.7~308.7		4.07~5.86	6
D10-2	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				209.2~297.1	-7.2~-5.8	7.39~11.34	13
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.5	7.8	30.5	278.8		4.26	1
D25	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				201.7~253.7	-7.4~-3.6	5.78~10.98	10
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.6~-57.5	6.1~7.5	29~30.5	228.3~299.9		4.80~7.21	4
D43	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				211.5~250.8	-6.6~-1.1	1.82~9.97	8
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.7~-57.9	6.3~7	28.9~30.9	234.1~321.1		5.68~6.88	3
D49	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				217.5~263.1	-8.5~-4.1	6.52~12.29	12
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.4~-57.5	7~9	30.5~30.8	254.3~306.1		2.00~5.68	3
D53	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				217~268.3	-7.1~-4.4	6.96~10.61	14
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-57.7	7.5	30	294.2		4.80	1
D60	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				220.4~289.4	-7.4~-3.8	6.08~10.98	12
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.2~-57.6	6.9~7.6	29.5~30.7	278.2~307.3		4.62~5.86	2
D69	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				233.2	-5.8	8.92	1
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-59.3	8.3	29.2	313.8		3.33	1
D75	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				218~221.9	-6.8~-4.3	6.82~10.23	3
D91	I型H <sub>2</sub> O溶液包裹体				216.4~284.6	-7.5~-4.2	6.67~11.10	12
	II型含CO <sub>2</sub> 包裹体	-58.3~-57.4	6.8~7.3	29.9~30.8	280~286.2		5.15~6.03	2

11.33~13.90,  $\delta D_{V-SMOW}$  为-83.3‰~-67.2‰。不同成矿阶段  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  和  $\delta D_{V-SMOW}$  值没有明显变化。通过  $\delta^{18}O_{H_2O}$  计算公式得到高家店金矿床的  $\delta^{18}O_{H_2O}$  介于 1.82‰~5.60‰, 平均值 3.78‰, 其中 I 阶段为 2.67‰~3.94‰, II 阶段为 1.82‰~4.18‰, III 阶段为 3.03‰~5.60‰, 不同成矿阶段的  $\delta^{18}O_{H_2O}$  变化较小。氢同位素采用  $\delta D_{V-SMOW}$  的数值。

#### 4.5 硫同位素组成

主成矿阶段黄铁矿的 LA-MC-ICP-MS 原位 S 同位素测试结果见表 5, 结果显示, 18 个黄铁矿  $\delta^{34}S$  的值为 2.40‰~5.61‰, 平均值为 4.05‰, 数据范围窄, 极差较小, 反映了硫同位素均一程度高。Ohmoto 等 (1979) 认为在矿石矿物组成较简单且未见硫酸盐矿物时, 热液的总硫值可用矿物的  $\delta^{34}S$  平均值代表。高家店金矿床矿物成分简单, 硫化物主要为黄铁矿, 其他硫化物较少, 且未发现有硫酸盐矿物存在, 因此, 矿物中  $\delta^{34}S$  平均值可代表热液中总  $\delta^{34}S$  值, 为 4.05‰。

## 5 讨论

### 5.1 金的赋存状态

本次根据光学显微镜下照片和电子探针背散射图像对高家店金矿石的观察, 金矿物粒径多介于 25~70  $\mu m$ , 部分介于 1~25  $\mu m$ , 个别长径可达 123  $\mu m$ , 多数属于中粒金和细粒金, 少数为微细粒金, 极个别属于粗粒金 (微细粒金:  $\leq 10 \mu m$ ; 细粒金: 10~37  $\mu m$ ; 中粒金 37~74  $\mu m$ ; 粗粒金: 74~295  $\mu m$ ; 巨粒金:  $> 295 \mu m$ ) (姚敬劬, 1991; 冯京等, 2022; 王英鹏等, 2022)。金矿物形态以浑圆粒状、角粒状、枝杈状为主, 片状、麦粒状次之, 个别为针状, 赋存状态以裂隙金为主 (图 8a~f), 金矿物主要分布于黄铁矿裂隙或晶隙中、少量分布于石英裂隙中。

4 颗“可见金”的电子探针分析结果显示 (表 2), 2 颗为自然金, 2 颗为银金矿。自然金的  $w(Au)$  分别为 82.262%、85.367%,  $w(Ag)$  分别为 15.813%、12.479%

表4 高家店金矿床石英氢、氧同位素测试结果表  
Table 4 Hydrogen and oxygen isotope test results of quartz in the Gaojiadian gold deposit

样品号	成矿阶段	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$
D06-2		-62.9	12.24	3.95	264.5
D07-1	I 阶段	-61.6	12.15	3.86	264.5
D08		-63.7	10.97	2.67	264.5
D09-4		-73.4	11.50	3.21	264.5
D09-8		-65.5	10.77	2.48	264.5
D10-2	II 阶段	-60.3	10.12	1.82	264.5
D10-3		-55.3	10.23	1.93	264.5
D25		-71.4	12.48	4.18	264.5
D26-2		-71.4	11.84	3.55	264.5
D29		-65.6	10.62	2.32	264.5
D49		-71.9	11.33	3.03	264.5
D53		-76.5	12.58	4.29	264.5
D60		-4.4	12.61	4.31	264.5
D65		-75.1	13.30	5.00	264.5
D66	III 阶段	-4.2	13.40	5.11	264.5
D67		-83.3	13.90	5.60	264.5
D72		-74.4	12.68	4.39	264.5
D73		-67.2	12.29	4.00	264.5
D77		-78.9	12.81	4.51	264.5
D90		-81.9	13.12	4.82	264.5
D91		-76.7	12.57	4.27	264.5

注:  $1000\ln\alpha_{\text{石英-H}_2\text{O}}=3.38\times 10^6/T^2-3.4$  (Clayton et al., 1972), 其中式  
中  $T=t+273.15$ ,  $t$  为所测矿物中包裹体均一温度( $^\circ\text{C}$ )的算术平均值,  
本次取平均温度  $264.5^\circ\text{C}$ 。

(自然金,  $\text{Au}:\text{Au}>80\%$ 、 $\text{Ag}<20\%$ ); 银金矿中  $w(\text{Au})$  分别为  
65.153%、73.231%,  $w(\text{Ag})$  分别为 32.713%、24.136%

(银金矿,  $\text{Au}:\text{Ag}:\text{Au} 80\%\sim 50\%$ 、 $\text{Ag} 20\%\sim 50\%$ )。

26 颗黄铁矿电子探针分析结果显示, 6 颗金低于检测限, 剩余 20 颗测得  $w(\text{Au})=0.002\%\sim 0.050\%$ , 推测高家店金矿中存在不可见金, 分布于黄铁矿晶体  
内。但由于  $w(\text{Au})(0.002\%\sim 0.050\%)$  很低, 接近检出  
限, 因此高家店金矿中存在不可见金的推断有待于  
进一步研究。

总体而言, 高家店金矿床中黄铁矿是金的主要  
载体矿物。Au 主要以独立金矿物(自然金、银金矿)  
的形式赋存于黄铁矿中, 少量金赋存在石英中。

### 5.2 黄铁矿成分对矿床成因的指示

高家店金矿床黄铁矿电子探针测得的结果表  
明,  $w(\text{Fe})$  为 45.69%~46.76%, 平均值为 46.33%,  $w(\text{S})$   
为 52.92%~54.37%, 均值为 53.55%; 其  $w(\text{S})$ 、 $w(\text{Fe})$   
高于卡林型金矿( $w(\text{S}): 51.03\%$ 、 $w(\text{Fe}): 44.86\%$ ); 与  
变质热液型相比( $w(\text{S}): 52.72\%$ 、 $w(\text{Fe}): 46.76\%$ ), 研  
究区内黄铁矿表现出较高的  $w(\text{S})$  和较低的  $w(\text{Fe})$ 。  
黄铁矿的  $\text{Fe}/\text{S}$  平均值为 0.865, 与热液成因黄铁矿的  
 $\text{Fe}/\text{S}$  值(0.877)(王奎仁, 1987; 严育通, 2012; 孔德鑫  
等, 2013)接近, 可推测高家店金矿床为岩浆热液矿  
床。此外个别测点(D09-4-Py-1、D25-Py-1、D68-Py-  
1 和 D68-Py-2)的  $w(\text{As})$  较高, 分别为 0.007%、  
0.036%、0.029% 和 0.024%, 其余测点均低出检测  
线, 暗示可能有少量大气水加入(Zhang Y W, 2020;  
许杨等, 2021)。

### 5.3 成矿流体性质与来源

通过本次的流体包裹体岩相学和显微测温结果  
的分析, 作者认为主成矿阶段(II、III 阶段)主要为  
 $\text{H}_2\text{O}$  溶液包裹体和含  $\text{CO}_2$  包裹体, 室温下为两相  
( $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}_{\text{CO}_2}$ ) 或三相( $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{L}_{\text{CO}_2}+\text{V}_{\text{CO}_2}$ ),  $\text{H}_2\text{O}$  溶液包

表5 高家店金矿床黄铁矿原位硫同位素分析结果表

Table 5 In-situ sulfur isotope analysis results of pyrite in the Gaojiadian gold deposit

序号	样号	成矿阶段	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	序号	样号	成矿阶段	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	D09-4-1	主成矿阶段	2.65	10	D49-1	主成矿阶段	4.05
2	D09-4-2	主成矿阶段	2.40	11	D49-2	主成矿阶段	4.02
3	D25-1	主成矿阶段	4.29	12	D59-1	主成矿阶段	3.97
4	D26-2-1	主成矿阶段	4.97	13	D68-1	主成矿阶段	3.07
5	D26-2-2	主成矿阶段	4.21	14	D68-2	主成矿阶段	3.38
6	D48-1	主成矿阶段	4.25	15	D71-1	主成矿阶段	4.38
7	D48-3	主成矿阶段	4.24	16	D71-2	主成矿阶段	5.38
8	D47-2	主成矿阶段	5.61	17	D77-1	主成矿阶段	3.14
9	D47-3	主成矿阶段	5.43	18	D91-1	主成矿阶段	3.43

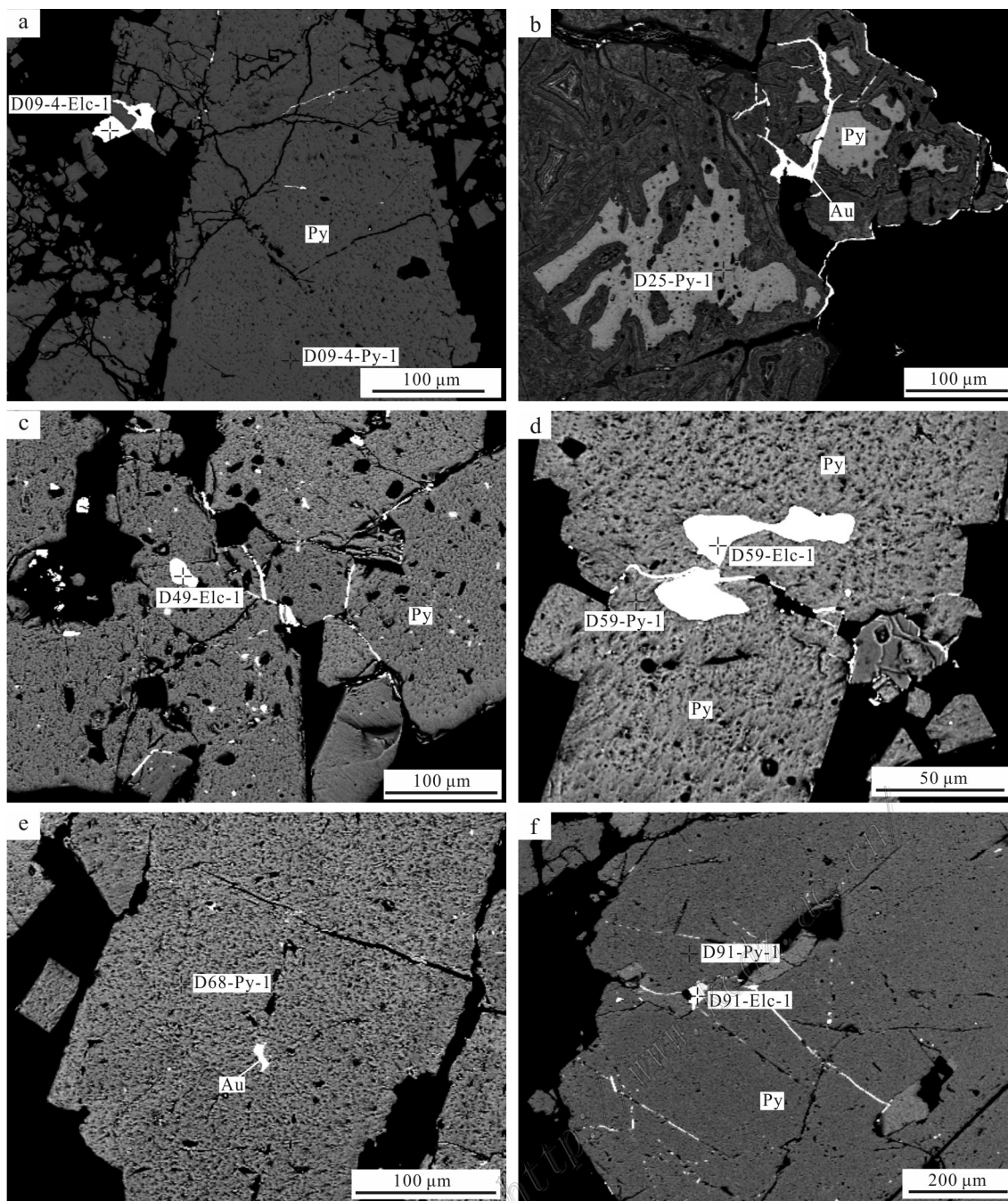


图 8 高家店金矿床矿石黄铁矿中裂隙金 BSE 照片

a, e, f. 金呈角砾状赋存于黄铁矿裂隙中; b. 金呈枝杈状赋存于黄铁矿裂隙中, 向两侧延伸到石英中; c. 金呈浑圆粒状赋存于黄铁矿裂隙中; d. 金呈麦粒状赋存于黄铁矿裂隙中

Py—黄铁矿; Au—金矿物; D09-4-Elc/Py-1—金矿物/黄铁矿的激光剥蚀位置及编号

Fig. 8 BSE images of ore minerals showing gold is distributed in pyrite as fissure-type from the Gaojiadian gold deposit  
a, e, f. Gold occurs as breccias in pyrite fissures; b. Gold occurs as branches in pyrite fissures and extends to the quartz on both sides; c. Gold occurs as oblate granules in pyrite fissures; d. Gold occurs as wheat grains in pyrite fissures

Py—Pyrite; Au—Gold mineral; D09-4-Elc/Py-1—Laser ablation location and numbering of gold mineral/pyrite

裹体比例占 50% 以上, 完全均一温度为 202~322°C, 均值为 264.5°C, 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 1.82%~12.29%, 均

值为 7.06%, 属中温、中低盐度流体。

高家店金矿床所有矿石样品 H-O 同位素在

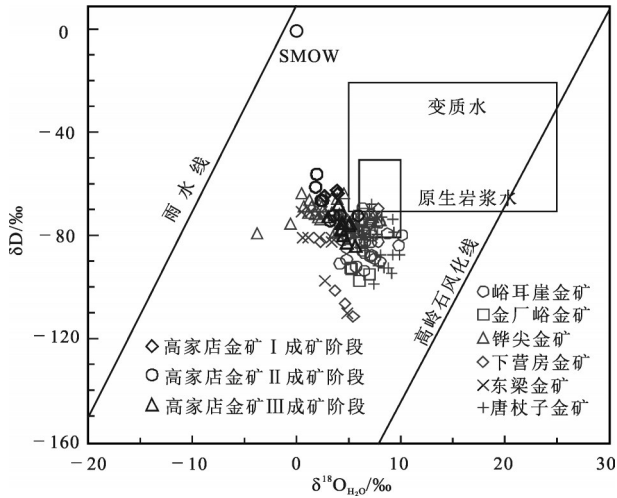


图9 高家店金矿床成矿流体  $\delta^{18}O_{H_2O}$ - $\delta D$  图解  
 氢-氧同位素数据来源: 峪耳崖金矿引自接白, 2013; 王卓, 2020; 金厂峪金矿引自付宇鹏, 2012; 铍尖金矿引自王涛, 2012; 孔德鑫等, 2013; 石成龙等, 2015; 下金宝和东梁金矿引自辛存林等, 2014; 马晓辉, 2015; 王宁宇, 2020; 唐杖子金矿引自贺文, 2015

Fig. 9  $\delta^{18}O_{H_2O}$ - $\delta D$  diagram of metallogenic fluid in the Gaojiadian gold deposit

Sources of H-O isotopes data: Yu'erya gold deposit cited in Jie, 2013; Wang, 2020; Jinchangyu gold deposit cited in Fu, 2012; Huajian gold deposit cited in Wang, 2012; Kong et al., 2013; Shi et al., 2015; Xiajinbao and Dongliang gold deposit cited in Xin et al., 2014; Ma, 2015; Wang, 2020; Tangzhangzi gold deposit cited in He, 2015

$\delta^{18}O_{H_2O}$ - $\delta D$  图解(图9)中, 投影点均落入原生岩浆水附近, 并有向雨水线漂移的趋势, 与区域峪耳崖、金厂峪、铍尖等金矿床的H-O同位素结果基本一致, 显示高家店金矿床成矿早期和主成矿期成矿流体主要来自岩浆水, 随着流体演化后期有少量大气降水混入。

5.4 成矿物质来源

高家店金矿床黄铁矿的  $\delta^{34}S$  值为 2.40‰~5.61‰, 平均值为 4.05‰, 主要集中于 4‰~5‰ (图10a), 显示地幔硫或岩浆硫特征 ( $\delta^{34}S = -5‰ \sim 5‰$ ) (Ohmoto, 1972; Ohmoto et al., 1979) (图10b), 与冀东地区燕山期典型的具有岩浆硫特征的金矿如峪耳崖金矿(-0.3‰~5.3‰), 金厂峪金矿(-5‰~6‰), 铍尖金矿(1.5‰~5.4‰), 牛心山金矿(3.1‰~6.3‰), 下金宝金矿(-0.2‰~3.7‰), 东梁金矿(-2.1‰~4.3‰)和唐杖子金矿(2.1‰~5.5‰)硫同位素组成基本一致(图10b), 表明高家店金矿床成矿物质中的硫主要来自于深部岩浆。

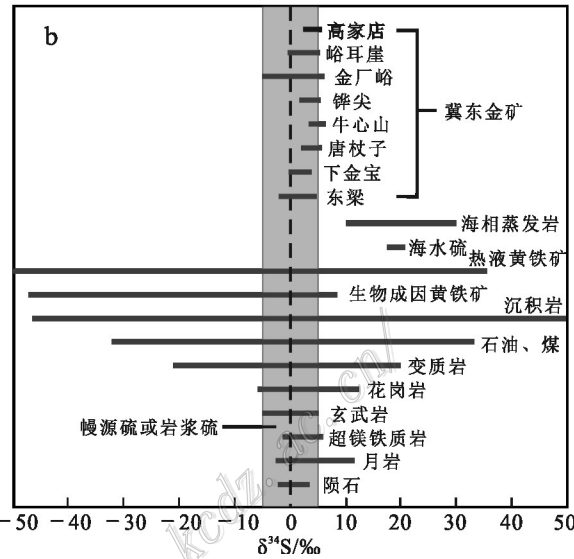
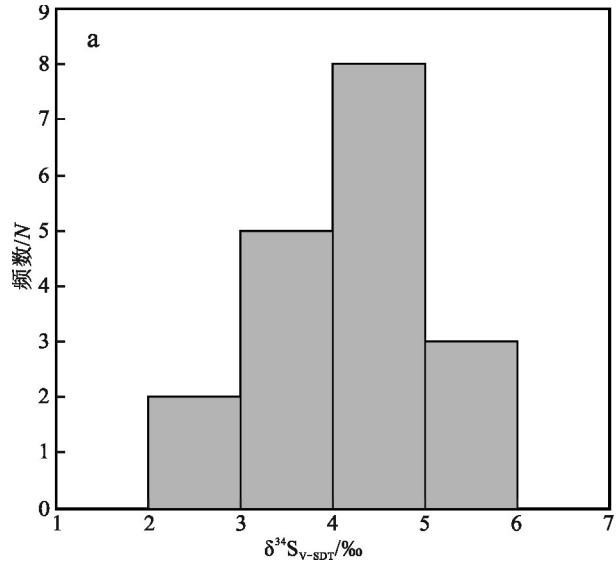


图10 高家店金矿床硫同位素组成  
 a. 高家店金矿床硫同位素直方图; b. 高家店金矿床与燕山期冀东地区主要金矿床硫同位素组成

数据来源: 峪耳崖金矿引自接白, 2013; Kong et al., 2015; Liu et al., 2016; 金厂峪金矿引自张秋生等, 1991; Song et al., 2016; Zhang et al., 2020b; 铍尖金矿引自石成龙等, 2015; 牛心山金矿引自熊乐, 2017; 下金宝金矿引自Liu et al., 2018; 东梁金矿引自辛存林等, 2014; 唐杖子金矿引自贺文, 2015

Fig. 10 Sulfur isotope composition of the Gaojiadian gold deposit

a. Histogram of sulfur isotopes from the Gaojiadian gold deposit; b. The sulfur isotope composition of the Gaojiadian gold deposit and the main gold deposits in eastern Hebei Province during the Yanshan period Source of data: Yu'erya gold deposit cited in Jie, 2013; Kong et al., 2015; Liu et al., 2016; Jinchangyu gold deposit cited in Zhang et al., 1991; Song et al., 2016; Zhang et al., 2020b; Huajian gold deposit cited in Shi et al., 2015; Niuxinshan gold mine cited in Xiong, 2017; Xiajinbao gold deposit cited in Liu et al., 2018; Dongliang gold deposit cited in Xin, 2014; Tangzhangzi gold deposit cited in He, 2015

## 5.5 矿床成因

高家店金矿床的成矿作用主要发生在高家店杂岩体内近SN向和NW向断裂中;矿石类型有石英脉型和蚀变岩型矿石;赋矿围岩为花岗岩和闪长岩,作者曾对赋矿围岩花岗岩和闪长岩进行锆石U-Pb定年,结果两者显示形成于176~175 Ma的早侏罗世晚期,限定金成矿作用发生于该时期之后(~175 Ma),推测应为中侏罗世一晚侏罗世,与区域大规模的金成矿作用同期(154~175 Ma)(作者另文待发表)。载金黄铁矿和金矿物电子探针成分分析表明高家店金矿床金矿物为自然金和银金矿,以裂隙金的形式赋存于黄铁矿裂隙或晶隙中,少量分布于石英裂隙中,具有岩浆热液型金的特点。流体包裹体均一法测温显示成矿流体以中温、中低盐度流体为特征;氢-氧同位素组成表明成矿流体以岩浆水为主,并有少量大气降水的加入;硫同位素组成也显示成矿物质来源于深部岩浆;综合高家店金矿床地质特征,载金黄铁矿和金矿物化学成分分析、流体包裹体、氢氧硫同位素等地球化学特征,认为高家店金矿床的形成与高家店岩体的侵入密切相关,高家店岩体的多期次岩浆侵入活动为金矿的形成提供了充足的热源及成矿流体,促使流体对流循环,因而,推断高家店金矿床为中温岩浆热液型矿床。

## 6 结 论

(1) 高家店金矿床成矿作用分为热液期和表生期。其中热液期包括4个阶段,分别为第I阶段的乳白色石英阶段、第II阶段的石英-黄铁矿阶段、第III阶段的石英-多金属硫化物阶段和第IV阶段的碳酸盐阶段,其中II和III阶段为金的主要成矿阶段。表生期为矿体被暴露到地表或接近地表后遭受强氧化及风化剥蚀形成的矿体。

(2) 岩相学观察表明,高家店金矿床中黄铁矿是金的主要载体矿物,金矿物为自然金和银金矿,以裂隙金的形式赋存于黄铁矿裂隙或晶隙中,少量分布于石英裂隙中。黄铁矿 $w(\text{Fe})=45.69\%\sim 46.76\%$ , $w(\text{S})=52.92\%\sim 54.37\%$ ,原子个数比 $\text{S}/\text{Fe}=1.98\sim 2.07$ ,化学式 $\text{FeS}_{1.98}\sim \text{FeS}_{2.07}$ ,结合 $\text{Fe}/\text{S}$ 值,指示金矿床具有岩浆热液型的特征。

(3) 高家店金矿床主成矿阶段(II、III阶段)流体包裹体类型以富液相的两相 $\text{H}_2\text{O}$ 溶液包裹体为主,其次为含 $\text{CO}_2$ 三相包裹体,均一温度为202~

322 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为1.82%~12.29%,属中温、中低盐度流体。早成矿阶段和主成矿阶段的H-O同位素特征表明,流体主要来自岩浆水,并有少量大气降水混入。主成矿阶段黄铁矿S同位素特征显示,成矿物质S主要来自于深部岩浆。

(4) 根据矿床地质和地球化学特征推断,高家店金矿床为与高家店杂岩体侵入密切相关的中温岩浆热液型矿床,多期次岩浆侵入活动为金成矿提供了充足的热源及成矿流体。

**致 谢** 本文测试分析得到了河北廊坊区域地质调查研究所实验室和北京皓年领航科技有限公司的大力帮助,匿名审稿专家对文章的修改提出了宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

## References

- Chen S C, Ye H S, Wang Y T, He W, Zhang X K and Wang N Y. 2019.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  age of altered sericite from Yuerya Au deposit in eastern Hebei Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 38(3): 557-70(in Chinese with English abstract).
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27: 43-52.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057-3067.
- Feng J, Xu S Q, Deng J, He F B, Xue X L, Yin D G, Xue C J, Hao Y H, Li P and Zhao T Y. 2022. Geological characteristics, gold occurrence state and genesis of Woke gold deposit in West Kunlun[J]. *Mineral Deposits*, 41(3): 623-642(in Chinese with English abstract).
- Feng W X. 2017. Genesis of the Yuerya gold deposit, Hebei Province[D]. Supervisor: Zhang J and Zhang Z J. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-48(in Chinese with English abstract).
- Fu Y P. 2012. Research on geochemical characteristics and genesis of Jinchangyu gold deposit, eastern Hebei Province[D]. Supervisor: Wang J P and Liu Y L. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-55(in Chinese with English abstract).
- Gong H S, Han R S, Wu P, Ma L and Chen G. 2022. Constraints of fluid inclusion and H-O-S-Pb isotope compositions on metallogenic model of Jinniuchang Pb-Zn deposit, SW China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 32(10): 3206-3226(in Chinese with English abstract).
- He W. 2015. The study of geology, geochemical and mineralization of Tangzhangzi Au polymetallic deposit, East Hebei Province[D]. Supervisor: Mao J W and Ye H S. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-81(in Chinese with English abstract).



- Jia S S, Wang E D, Fu J F and Guo Y Y. 2012. Ore-forming geological characteristics, geochemistry and formation mechanism of Jinchangyu gold deposit in eastern Hebei Province[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 33(10): 1492-1495(in Chinese with English abstract).
- Jia S S, Wang E D, Fu J F, Men Y K and Wu M G. 2014. Geology, geochemistry and metallogenic mechanism of Yuerya gold deposit in the eastern Hebei Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 774-785(in Chinese with English abstract).
- Jie B. 2013. The geochemical characteristic and the ore-forming material source of Yuerya gold mine in Hebei Province[D]. Supervisor: Hu J Z. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-65 (in Chinese with English abstract).
- Kong D X, Yin J W, Hu J Z, Li J, Guo Y, Yang H T, Shao X K, Hu B and Tian L J. 2013. Mineralogical characteristics of metallic minerals in Yuerya gold deposit of eastern Hebei Province and their combination significance[J]. *Mineral Deposits*, 32(2): 436-452(in Chinese with English abstract).
- Kong D X, Xu J F, Yin J W, Chen J L, Li J, Guo Y, Yang H T and Shao X K. 2015. Electron microprobe analyses of ore minerals and H-O, S isotope geochemistry of the Yu'erya gold deposit, eastern Hebei, China: Implications for ore genesis and mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 199-216.
- Li C S. 1995. Influence factor on the fineness of gold and electrum[J]. *Gold Geology*, 1(3): 61-66(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Ye H S, He W, Cao J, Zhang X K, Wang S, Lu D Y and Li C. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit in eastern Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1366-1378(in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Nie F G and Bagas L. 2016. Geology and ore genesis of the Yu'erya gold deposit, eastern Hebei Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 270-283.
- Liu Q Q, Shao Y J, Liu Z F, Zhang J G, and Wang C. 2018. Origin of the granite porphyry and related Xiajinbao Au deposit at Pingquan, Hebei Province, northeastern China: Constraints from geochronology, geochemistry, and H-O-S-Pb-Hf isotopes[J]. *Minerals*, 8(8): 330.
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, Qiu Y S, Qiu Y M, McNaughton N J and Groves D I. 2003. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholith and related granite-porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 32(2): 173-180(in Chinese with English abstract).
- Ma X H. 2015. Metallogenic mechanism and prospecting direction of Xiayingfang gold deposit in Pingquan Country, Hebei Province[D]. Supervisor: Hu H B. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics. 1-67(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5): 551-578.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[M]. Wiley: New York. 509-567.
- Song Y, Jiang S H, Bagas L, Li C, Hu J Z, Zhang Q, Zhou W and Ding H Y. 2016. The geology and geochemistry of Jinchangyu gold deposit, North China Craton: Implications for metallogenesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 73(2): 313-329.
- Shi C L, Song Y, Hu J Z, Zhao B, Wang T and Liao Y Z. 2015. Characteristics and geological significance of stable isotopes in the Huajian gold deposit, Hebei Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(2): 362-368(in Chinese with English abstract).
- Wang J Q, Liu G J, Yu D, Li S B, Xu R L, Hong W W, Dong S, Liu Z P, Liu J Y and Gao M S. 2022. Characteristics of ore-forming fluids of Zhangmajing U-Mo deposit in Hebei: Evidence from fluid inclusions and isotopes of hydrogen and oxygen[J]. *Uranium Geology*, 38(1): 38-45(in Chinese with English abstract).
- Wang K R. 1987. Mineralogy of earth and cosmogenesis[M]. Hefei: Anhui Education Press. 1-100(in Chinese with English abstract).
- Wang N Y. 2020. Chronology and metallogenic material source of Dongliang gold deposit in eastern Hebei[D]. Supervisor: Xu L G and Ye H S. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-52(in Chinese with English abstract).
- Wang T. 2012. Study on the ore-forming geological process in Niuxinshan section of Hebei Huajian gold deposit[D]. Supervisor: Hu J Z. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-86(in Chinese with English abstract).
- Wang Y P, Zhu P G, Zhang W, Wang L G, Wang J H, Peng G F, Wang Y B and Li S B. 2022. Geological significances and geochemical compositions of gold and gold-bearing minerals from Zhaoxian deeply-seated gold deposit, Jiaodong area[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 255-272(in Chinese with English abstract).
- Wang Z. 2020. Minerals standard characteristics metallogenic fluid characteristics and genesis of Yu'erya gold deposit in eastern Hebei Province[D]. Supervisor: Zhang D H and Zhang J D. Beijing: China University of Geoscience (Beijing). 1-18(in Chinese with English abstract).
- Xin C L, Gong X, Zhu X L and Zhao Z P. 2014. Geological characteristics and genesis of DongLiang gold deposit in eastern Hebei Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 51-58(in Chinese with English abstract).
- Xiong L. 2017. The relationship between evolution of the Mesozoic magmatic rocks and gold metallogenesis in eastern Hebei-western Liaoning district[D]. Supervisor: Wei J H. Wuhan: China University of Geoscience (Wuhan). 1-166(in Chinese with English abstract).
- Xu Y, Lan T G, Shu L, Hu H L, Chen Y H and Wang H. 2021. Enrichment mechanisms of arsenic in pyrite from Sanshandao gold deposit (Jiaodong Peninsula, China) and implications for gold metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 40(3): 419-431(in Chinese with English abstract).
- Yan X L and Zhao G C. 2019. Sources and geochronology of ore-forming materials in the gold ore concentration area of eastern Hebei

- Province[J]. Journal of Hebei Geological University, 42(2): 26-32 (in Chinese with English abstract).
- Yan Y T, Li S R, Jia B J, Zhang N and Yan L N. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistical analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Earth Science Frontier, 19 (4): 214-226(in Chinese with English abstract).
- Yang A X, Sun D Y, Hou X G, Wang J L, Zhang J L and Li L W. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of diorite of Yu'erya gold deposit area in eastern Hebei Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(2): 416-428(in Chinese with English abstract).
- Yang A X, Sun D Y, Zhang J L, Hou X G, Li L W and E J X. 2016. Zircon U-Pb dating of diorite dikes from Yu'erya gold district in eastern Hebei Province[J]. Gold, 37(8): 14-18(in Chinese with English abstract).
- Yang F L, Niu B G, Ren J S and Li S. 2015. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Mesozoic intrusive bodies along the core of the Malanyu anticline and their tectonic significances[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(4): 455-465(in Chinese with English abstract).
- Yao J Q. 1991. Some characteristics of grain size distribution of natural gold in rock gold deposits in China and its genetic significance[A]. Compilation of papers of the third National Symposium on Rock and Mineral Resources of Nonferrous and Metallurgical Geological Systems[C]. 86-89(in Chinese).
- Yin Y C, Hao L B, Zhao Y Y, Shi H L, Tian W, Zhang Y H and Lu J L. 2018. Gaojiadian granite and Shepantu granite in eastern Hebei Province: Chronology, geochemistry and geological significances[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 48(2): 574-586 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Y, Wang S Z, Cao C, Wang T and Guo Z H. 2022. Mesozoic magmatism and metallogenic significance in eastern Hebei gold belt: Evidence from zircon mineralogy[J]. Geological Review, 68 (4): 1361-1374(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q S, Yang Z S and Gao D Y. 1991. The Archaean high-grade metamorphic geology and gold deposits in Jinchangyu area of eastern Hebei Province[M]. Beijing: Geological Publish House. 1-443(in Chinese).
- Zhang Y W, Hu F F, Fan H R, Liu X, Feng K and Cai Y C. 2020a. Fluid evolution and gold precipitation in the Muping gold deposit (Jiaodong, China): Insights from in-situ trace elements and sulfur isotope of sulfides[J]. Journal of Geochemical Exploration, 218: 106617.
- Zhang L C, Bai Y, Zhu M T, Huang K and Peng Z D. 2020b. Regional heterogeneous temporal-spatial distribution of gold deposits in the North China Craton: A review[J]. Geological Journal, 55(8): 5646-5663.
- Zou T, Wang Y W, Wang J B, Zhang H Q, Zhao L T, Xie H J, Shi Y, Liu Y Z and Liu G Q. 2016. Geochronology of the Xiayingfang Au deposit in eastern Hebei Province[J]. Geology and Exploration, 52(1): 84-97(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈绍聪, 叶会寿, 王义天, 贺文, 张兴康, 王宁宇. 2019. 冀东峪耳崖金矿床蚀变绢云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 38 (3): 557-570.
- 封文学. 2017. 冀东峪耳崖金矿床成因研究[D]. 导师: 张静, 张增杰. 北京: 中国地质大学(北京). 1-48.
- 冯京, 徐仕琪, 邓军, 何福保, 薛小龙, 尹得功, 薛春纪, 郝延海, 李平, 赵同阳. 2022. 西昆仑沃克金矿床地质特征、金的赋存状态及矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 41(3): 623-642.
- 付宇鹏. 2012. 冀东金厂峪金矿床地球化学特征及成因探讨[D]. 导师: 王健平, 刘玉琳. 北京: 中国地质大学(北京). 1-55.
- 龚红胜, 韩润生, 吴鹏, 马玲, 陈刚. 2022. 滇东北金牛厂铅锌矿床成矿模式: 来自流体包裹体、H-O-S-Pb同位素证据[J]. 中国有色金属学报, 32(10): 3206-3226.
- 贺文. 2015. 冀东唐杖子金多金属矿床地质-地球化学特征与成矿作用研究[D]. 导师: 毛景文, 叶会寿. 北京: 中国地质大学(北京). 1-81.
- 贾三石, 王恩德, 付建飞, 郭耀宇. 2012. 冀东金厂峪金矿床成矿地质特征、矿床地球化学及其成因机制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 33(10): 1492-1495.
- 贾三石, 王恩德, 付建飞, 门业凯, 吴明刚. 2014. 冀东峪耳崖金矿床成矿地质特征、矿床地球化学及其成因机制探析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 774-785.
- 接白. 2013. 冀东峪耳崖金矿床地球化学特征及成矿物质来源研究[D]. 导师: 胡建中. 北京: 中国地质大学(北京). 1-65.
- 孔德鑫, 尹京武, 胡建中, 李娇, 郭媛, 杨海涛, 邵兴坤, 胡兵, 田录军. 2013. 冀东峪耳崖金矿床金属矿物特征及其组合意义[J]. 矿床地质, 32(2): 436-452.
- 李正远, 叶会寿, 贺文, 曹晶, 张兴康, 王赛, 路东宇, 李超. 2014. 冀东唐杖子金(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 33(6): 1366-1378.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裴有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. 地球化学, 32(2): 173-180.
- 马晓辉. 2015. 河北省平泉县下营坊金矿成矿机制与找矿方向[D]. 导师: 胡华斌. 石家庄: 石家庄经济学院. 1-67.
- 石成龙, 宋扬, 胡建中, 赵博, 王涛, 廖煜钟. 2015. 河北华尖金矿稳定同位素特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(2): 362-368.
- 王建青, 刘高杰, 于达, 李松彬, 徐如磊, 洪文武, 董帅, 刘战鹏, 刘钧沅, 高明山. 2022. 河北张麻井钼钨矿床成矿流体特征——来自流体包裹体及氢氧同位素的证据[J]. 铀矿地质, 38(1): 38-45.
- 王奎仁. 1987. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社. 1-100.
- 王宁宇. 2020. 冀东地区东梁金矿床年代学和成矿物质来源研究[D]. 导师: 徐林刚, 叶会寿. 中国地质大学(北京). 1-52.
- 王涛. 2012. 河北铍尖金矿牛心山矿段成矿地质作用研究[D]. 导师: 胡建中. 北京: 中国地质大学(北京). 1-86.

- 王英鹏, 祝培刚, 张文, 王立功, 王金辉, 彭观峰, 王永彬, 李慎斌. 2022. 胶东地区招贤深部金矿床金和载金矿物化学成分及其地质意义[J]. 矿床地质, 41(2):255-272.
- 王卓. 2020. 冀东峪耳崖金矿床矿物标型特征、成矿流体特征及矿床成因探讨[D]. 导师: 张德会, 张计东. 北京: 中国地质大学(北京). 1-118.
- 辛存林, 巩鑫, 朱晓磊, 赵志鹏. 2014. 冀东地区东梁金矿床地质特征及成因[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 51-58.
- 熊乐. 2017. 冀东—辽西地区中生代岩浆演化与金成矿关系[D]. 导师: 魏俊浩. 武汉: 中国地质大学(武汉). 1-166.
- 许杨, 蓝廷广, 舒磊, 胡换龙, 陈应华, 王洪. 2021. 胶东三山岛金矿床黄铁矿 As 富集机制及其对金成矿作用的指示[J]. 矿床地质, 40(3): 419-431.
- 烟晓玲, 赵改超. 2019. 冀东金矿矿集区成矿物质来源及年代学研究[J]. 河北地质大学学报, 42(2): 26-32.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 杨爱雪, 孙德有, 侯雪刚, 王久良, 张继林, 李临位. 2021. 冀东峪耳崖金矿区闪长岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 416-428.
- 杨爱雪, 孙德有, 张继林, 侯雪刚, 李临位, 鄂建新. 2016. 冀东峪耳崖金矿区闪长岩脉的锆石 U-Pb 年龄测定[J]. 黄金, 37(8): 14-18.
- 杨付领, 牛宝贵, 任纪舜, 李舫. 2015. 马兰峪背斜核部中生代侵入岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地球学报, 36(4): 455-465.
- 姚敬勋. 1991. 中国岩金矿档中自然金粒度分布的某些特征及其成因意义[A]. 第三届全国有色、冶金地质系统岩矿学术交流会议论文集[C]. 86-89.
- 尹业长, 郝立波, 赵玉岩, 石厚礼, 田午, 张豫华, 陆继龙等. 2018. 冀东高家店和蛇盘兔花岗岩体: 年代学、地球化学及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(2):574-586.
- 张岱岳, 王树志, 曹冲, 王涛, 郭志华. 2022. 冀东金矿带中生代岩浆作用及其成矿意义——来自锆石矿物学证据[J]. 地质论评, 68(4): 1361-1374.
- 张秋生, 杨振升, 高德玉. 1991. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-443.
- 邹滔, 王玉往, 王京彬, 张会琼, 赵路通, 解洪晶, 石煜, 刘永振, 刘贵权. 2016. 冀东下营坊金矿成矿年代学研究[J]. 地质与勘探, 52(1): 84-97.