

胶东牟乳成矿带金青顶金矿床成矿流体特征及成矿作用探讨

宋倩¹, 黄鑫^{1,2,3}, 王勇军^{1,2,3}, 邵玉宝^{1,3}, 路长勇^{1,3}, 李泗龙^{1,3}

(1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 山东省应急管理厅非煤矿山隐蔽致灾评估与防控重点实验室, 山东 济南 250104)

摘要: 牟乳成矿带是胶东金矿集区三大金成矿带之一, 金青顶金矿床位于该成矿带南段, 是大型石英脉型金矿床, 其成矿流体的研究还存在争议。本文从矿石石英中流体包裹体和 H-O 同位素研究入手, 结合矿床地质特征, 对成矿流体和成矿作用进行探讨。流体包裹体岩相学研究显示, 矿石石英中的原生包裹体以气液两相包裹体和纯液相水溶液包裹体为主, 另有少量含 CO₂ 三相包裹体。显微测温结果及计算表明, 均一温度主要在 188.7~252.1 °C, 盐度大多为 4.23%~10.71%, 密度集中于 0.87~0.99 g/cm³, 成矿压力主要位于 48.9~67.3 MPa, 成矿深度 5.6~6.63 km。随着成矿作用进行, 温度、压力逐渐降低, 密度逐渐升高。H-O 同位素测试表明, δD 值主要介于 -96.0‰~-83.2‰之间, $\delta^{18}O$ 值主要介于 3.06‰~5.58‰之间。成矿流体主要来自于岩浆水和变质水的混合, 流体降温和不混溶是成矿物质短时间内大量沉淀的主要机制。综合认为金青顶金矿应属中低温、低盐度、低密度、中浅成特征的热液脉型金矿床。

关键词: 胶东; 矿床特征; 流体包裹体; 成矿作用; 金青顶金矿床; 牟乳带

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.004

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0030-16

引用格式: 宋倩, 黄鑫, 王勇军, 等. 胶东牟乳成矿带金青顶金矿床成矿流体特征及成矿作用探讨[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 30-45.

SONG Qian, HUANG Xin, WANG Yongjun, et al. Characteristics of ore-forming fluid and mineralization of jinqingding gold deposit in mouru metallogenic belt, jiaodong[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 30-45.

胶东以探明黄金资源储量超过 5 000 t 成为我国最重要的金矿省^[1-3], 同时, 它也被认为可能是全球唯一一个区内金成矿作用(约 120 Ma)比前寒武纪基底区域变质作用(约 2.9~1.9 Ga)晚约二十亿年的金成矿省^[4-5]。这种独特的成矿地质背景, 吸引了大量国内外专家学者对该区域进行研究^[6-8], 但关于成矿作用仍有众多关键科学问题尚未得到解决。牟乳—乳山成矿带(下文简称“牟乳成矿带”)是胶东三大金成矿带之一, 也是胶东金矿省唯一位于苏鲁造山带内的成规模矿带, 已发现了以南部的金青顶、中部的邓格庄和腊子沟以

及北部的双山屯等矿床为代表的硫化物石英脉型金矿床(点)百余处^[9], 其中金青顶金矿规模大、研究深入, 最为典型。金矿的形成与成矿流体的作用密不可分, 流体在成矿过程中扮演着十分重要的角色, 流体可以提供物质, 也可以溶解、搬运和沉淀成矿物质, 同时流体的运移还能扩展有利的成矿空间。所处大地构造位置的不同, 很可能带来包括成矿流体特征、来源与演化等在内的多方面差异, 而前人对这种差异的认识还存在争议。关于金青顶金矿床的成矿流体来源, 有学者认为成矿热液为变质热液^[10], 也有学者认为成矿

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 山东省部省协议地质勘查项目(鲁勘字(2022)32号); 山东省煤田地质局科研专项基金(鲁煤地科字(2023)33号); 山东省自然科学基金 ZR2020MD031; 山东省地质勘查基金项目(鲁勘字(2020)28号)资助

作者简介: 宋倩(1986-), 女, 高级工程师, 从事水工环地质勘查及成矿研究工作。

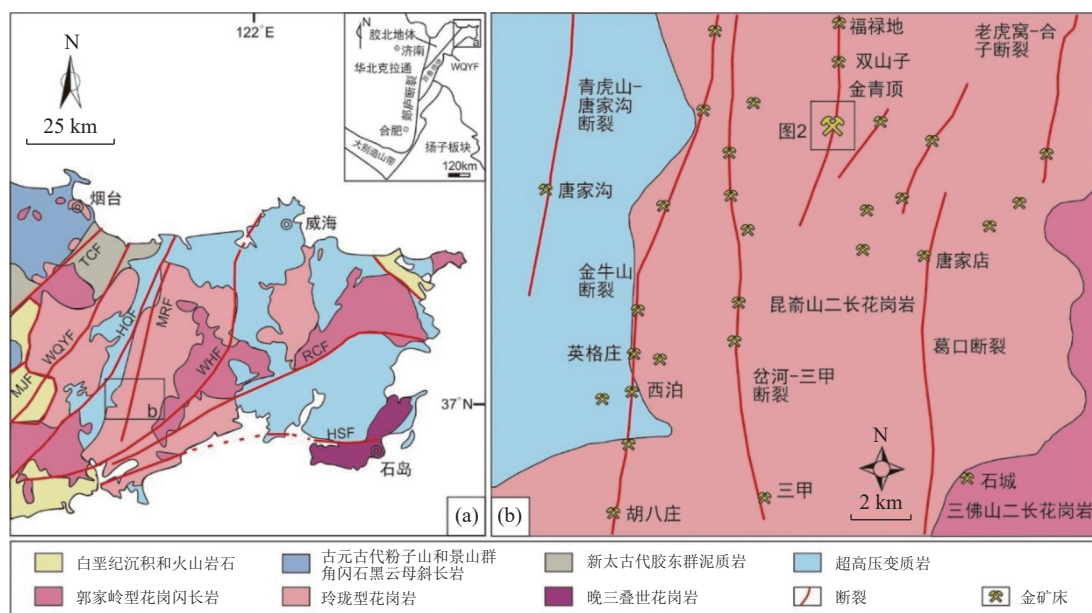
通信作者: 黄鑫(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事地质调查与矿产勘查、找矿预测等研究工作。

流体来源于与中基性脉岩有关的幔源流体^[1]，或者来源于基性幔源岩浆脱水形成的岩浆水^[2]，目前，多数学者认为胶东地区金矿成矿流体来源于天水与幔源流体的混合，金青顶金矿也是如此^[13]，但混合比例、过程等还不得而知。而关于成矿流体的沉淀机制，有学者认为水岩反应导致的成矿热液酸度变化和冷却是金沉淀成矿的主要原因^[14]的研究表明，金青顶金矿床的成矿流体主要沉淀机制为水岩反应和流体不混溶。上述研究多数未重视金青顶金矿所处的特殊大地构造背景，本文系统研究金青顶金矿床不同成矿阶段成矿流体特征、H-O 同位素特征，尝试在苏鲁造山带这一特殊大地构造背景下探讨成矿流体的性质、来源及成矿机制，对区域金矿成矿作用研究和找矿靶区选定具有一定参考价值。

1 区域地质背景

牟乳成矿带位于胶东东部（图1），区内出露

地层简单，主要为新太古界胶东群、古元古界荆山群和粉子山群、新元古界蓬莱群、中生界侏罗系、白垩系及第四系等。成矿带内广泛发育中生代岩浆岩，主要有燕山期昆嵛山岩体、三佛山岩体以及鹊山岩体。其中昆嵛山岩体分布最为广泛，岩性以黑云二长花岗岩为主，金青顶矿床即产于该岩体中。昆嵛山岩体为晚侏罗世玲珑期地壳重熔型花岗岩，具有复杂的物源组成^[15]。脆性断裂构造是区域主要构造类型，是主要的成矿热液运移通道（导矿）和赋矿场所（容矿），主要分为 NNE 向、NE 向和 EW 向三组。其中，NNE 向断裂纵贯全区，以葛口断裂、将军石断裂、金牛山断裂和唐家沟断裂为主，断裂之间呈近等距（约 5 km）分布，总体走向 5~20°。断裂内常产出碎裂岩化岩石、碎裂岩、硅化构造角砾岩、挤压透镜体等，主要发育硅化、绢英岩化、黄铁矿化、褐铁矿化、碳酸盐化等蚀变现象。断裂早期呈张性或者张扭性，被石英脉充填，晚期则为压扭性，总体显示以左旋压扭性特征为主。



HQF-海阳-青岛断裂；HSF-海阳-石岛断裂；MRF-牟平-乳山断裂；TCF-桃村断裂；WQYF-五莲-青岛-烟台断裂；WHF-威海断裂；RCF-荣成断裂 a 据文献 (LiQiang Yang et al.,2016) 修改

图1 研究区大地构造位置及区域地质简图

Fig.1 Tectonic and regional geological map of the study area

2 矿床地质特征

金青顶矿床位于将军石断裂南段，区内断裂构造发育，可分为成矿期断裂和成矿后断裂。成矿期断裂（区内编号 F3）属区域上将军石—曲河庄断裂的一部分，纵贯全区，也是矿区内规模最

大的断裂，矿床成矿位置反映矿床明显受该断裂控制断裂整体走向为 20°左右，赋矿位置走向处于 10~50°之间，倾角 77~90°（图2-A）。断裂在走向变化处有次级断裂，与主断裂平行或作为其分支分布，被含金黄铁矿脉所充填。成矿后断裂包括

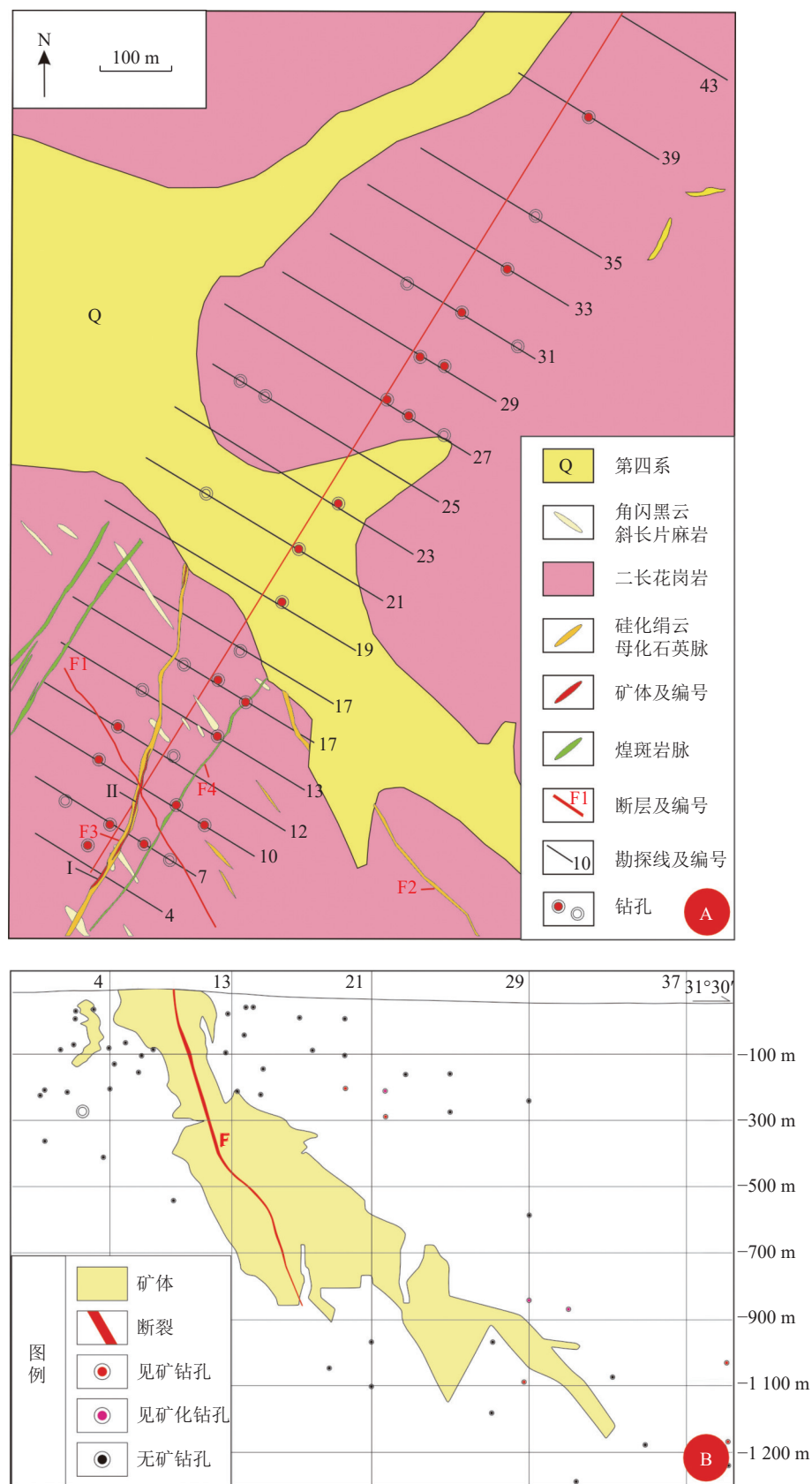


图 2 A 山东省乳山市金青顶金矿区地形地质简图 B 金青顶金矿床 II 号矿体纵投影

Fig.2 A Topographic and geological sketch map of Jinqingding gold mine area in Rushan city, Shandong Province; B Longitudinal projection of No. II ore body of Jinqingding gold mine

NE向断裂(编号F4)和NW向断裂(编号F1、F2)。区内地层不发育,以小捕虏体形式零星产出下元古界荆山群黑云斜长片麻岩和第四系松散沉积物。岩浆岩为昆崙山岩体中粗粒含黑云母二长花岗岩,基本覆盖全区,是金矿体的主要赋矿围岩,岩石呈浅红色或灰白色,呈中粒花岗结构、块状构造,主要造岩矿物为石英、钠长石、黑云母等。脉岩较为发育,以煌斑岩为主,往往同金矿脉密切相伴(图2-A)。

2.1 矿体

金青顶金矿床共发现矿体18个,主矿体为II号矿体(图2-B),其探明资源储量占全矿总量的96%。除II号矿体外的其余矿体均已经采空。II号矿体分布于4~35号勘探线之间,赋矿标高为120~-1 220 m。矿体严格发育于F1断裂内,受F1断裂构造控制,呈似板状、脉状,沿走向及倾向均呈舒缓波状。矿体厚度一般在2 m左右,Au品位为 $(2\sim 20)\times 10^{-6}$,存在数个富集中心,贫富矿体呈近似等间距出现,向深部间距有增大趋势。矿体总体走向约20°,倾向SE,倾角85°~90°,局部反倾。矿体在走向方向总长约1 500 m,地表出露长245 m(4~12勘探线之间),倾向方向延深约1 300 m。矿体明显向NE方向侧伏,侧伏角上陡下缓,在-785 m标高以上侧伏角约为55°~65°,深部则变缓为约30°。

2.2 矿石特征

2.2.1 矿物组成

根据详细的岩矿鉴定,金青顶矿床矿石矿物成分较简单,矿石均为硫化物石英脉型矿石,由金属矿物和非金属矿物组成。金属矿物组合主要是黄铁矿,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及自然金和银金矿等贵金属矿物,此外还可见少量辉铜矿、斑铜矿、毒砂以及磁黄铁矿。非金属矿物以绢云母、方解石、石英为主,次为长石及绿帘石,见少量重晶石、绿帘石、蒙脱石及高岭石。

(1) 金属矿物

黄铁矿:反射色呈灰白色,为矿石中主要的金属矿物,在矿床各个成矿阶段均有出现。第I阶段的多为大颗粒孤立黄铁矿,颗粒粗大,呈聚集的块状散布在石英中,受后期构造应力作用影响多发生破裂(图3-b);第II阶段多为细粒黄铁矿,呈团块状、条带状、细脉状集合体,常与

第II阶段石英组成石英-黄铁矿细脉(图3-e);第III阶段黄铁矿呈片状或细小颗粒以浸染状分布在石英中,是金的主要赋存载体,与黄铜矿、方铅矿等多金属硫化物共生,形成富矿石(图3-i),第IV阶段零星发育细粒黄铁矿颗粒(图3-l)。

黄铜矿:反射色为浅金黄色或铜黄色,在矿床第III阶段含量较多,多呈它形粒状与方铅矿、黄铁矿等金属硫化物共生,往往呈乳滴状产出于黄铁矿中,部分呈脉状或团块状发育于石英或黄铁矿裂隙中(图4-j)。

闪锌矿:反射色为白色,含量较少,常与主成矿阶段的金属矿物共生,多被其他矿物包裹(图4-k)呈不规则脉状产出,少部分呈现不规则长柱状聚集产出。

方铅矿:反射色为亮白色,可见三组解理构成的黑三角孔(图4-h、4-k),含量相对较少,多呈不规则的细脉状产出,与黄铜矿、黄铁矿、银金矿等共生,充填于石英和黄铁矿的裂隙中。

银金矿:是含金矿物的主要类型,反射色为金黄色,亮度比自然金低,由于硬度较低,表面常呈现被矿物摩擦后的擦痕。主要以裂隙金、晶隙金、包裹金的形式存在于矿脉中(图4-i)。

此外,黝铜矿、斑铜矿、磁黄铁矿等矿物在矿石中含量很少,一般不超过1%,为主成矿阶段的产物,与金的关系密切。

(2) 非金属矿物

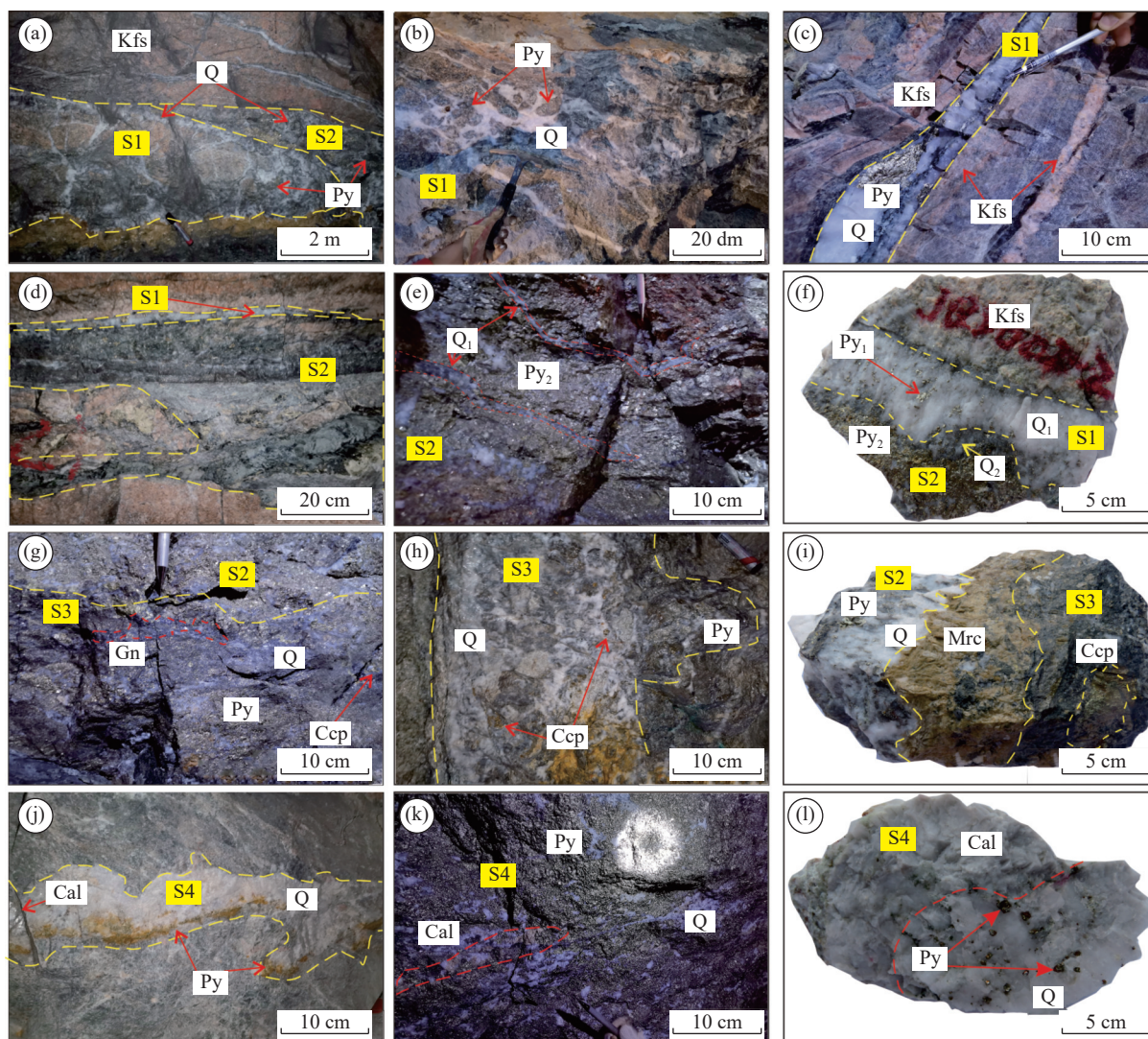
石英:为矿石中主要的非金属矿物,主要表现为三种形式:一种是呈石英细脉、网脉状产出,为硅质热液充填的结果,是良好的载金脉体;第二种为热液交代而成的石英,呈细粒状与绢云母共生,形成绢英岩化。第三种为残晶石英,多呈棱角状、碎裂状,由早期花岗岩中的石英重结晶形成(图3)。

绢云母:呈细小鳞片状、羽毛状集合体或细脉状分布,常与硅化石英共生,形成绢英岩化。

长石:经热液交代形成,长石类矿物被细小鳞片状绢云母和隐晶质硅化石英交代成残余粒状(图3-a、图3-c)。

方解石:在成矿作用第IV阶段形成,手标本上可见较好的三组解理,多呈纤维状产出(图3-j、图3-l)。

其他矿物如绿帘石、高岭土等矿物含量较



S1 为黄铁矿-石英阶段；S2 为石英-黄铁矿阶段；S3 为石英-多金属硫化物阶段；S4 为石英-碳酸盐阶段 a-c 为金青顶矿床黄铁矿-石英阶段不同矿物特征；d-f 为石英-黄铁矿阶段不同矿物特征；g-i 为石英-多金属硫化物阶段不同矿物特征；j-l 为石英-碳酸盐阶段不同矿物特征 Kfs: 钾长石；Py: 黄铁矿；Ccp: 黄铜矿；Sp 闪锌矿；Gn: 方铅矿；Mrc: 白铁矿

图3 金青顶矿床矿石宏观照片

Fig.3 Macro photo of Jinqingding ore deposit

少，均为热液蚀变的矿物，多呈细脉或者浸染状分布于矿石中。

2.2.2 矿石结构

金青顶矿床的矿石结构主要有自形晶结构、半自形-它形粒状结构、乳浊状结构、网脉状结构、包含结构、压碎结构和压溶结构等。

自形粒状结构：早期形成的粗粒-中粗粒黄铁矿矿石中多为自形粒状结构黄铁矿，晶形以五角十二面体为主，常与乳白色石英共生（图4-d）。

半自形粒状结构：中细粒-细粒黄铁矿矿石中常见，常与灰白-烟灰色石英共生，与自形黄铁矿相比属较晚期形成。

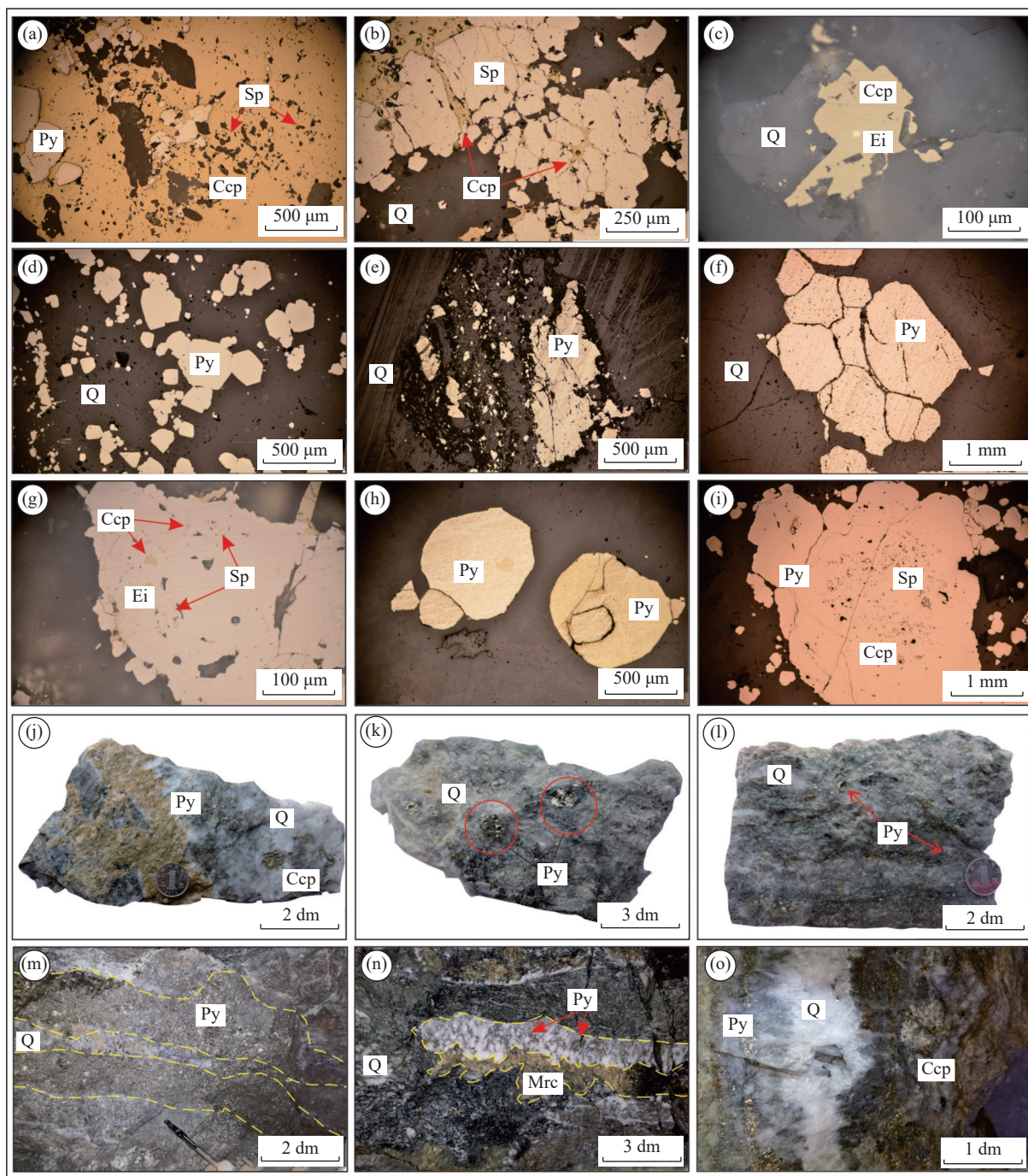
它形粒状结构：常见于细粒黄铁矿矿石中，黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等矿物呈不规则形状，与烟灰色石英共生。

压碎结构：早期黄铁矿受应力作用发生破碎，产生大量裂纹和裂隙，无明显位移（图4-e）。

填隙结构：常见闪锌矿、方铅矿等呈脉状充填于黄铁矿裂隙中（图4-g）。

角砾状结构：通常为早期形成的矿物受应力作用后，被压碎成角砾，后期再经过胶结而形成的结构类型（图4-f）。

乳浊状结构：闪锌矿、黄铁矿交代黄铜矿呈乳滴状分布，矿物之间的接触边缘不平滑呈锯齿



a 为乳浊状结构；b 为网脉状结构、填隙结构；c、g 为包含结构；d 为自形结构；e 为压碎结构；f 为压溶结构、角砾状结构；h 为半自形结构或它形结构；i 为乳浊状结构。j 为块状构造；k 为团块状构造；l 为浸染状构造；m 为脉状构造；n 为梳状构造，o 为晶洞/晶簇构造 Py：黄铁矿；Ccp：黄铜矿；Sp：闪锌矿；Ei：银金矿；Mrc：白铁矿；Q：石英

图4 金青顶矿床矿石主要结构构造特征

Fig.4 Main structural characteristics of Jinqingding ore deposit

状（图4-a）。

交代残余结构：黄铁矿被方铅矿、闪锌矿等其他矿物交代，仅残留一小部分未交代完全。

2.2.3 矿石构造

金青顶矿石构造主要为块状构造，其次还发

育浸染状构造、团块状构造、晶洞（晶簇）状构造、梳状构造、条带状和脉状等构造类型（图4-j~4-o）。

块状构造：黄铁矿等金属矿物呈块状集合体存在于烟灰色石英中，金青顶主成矿阶段形成的

矿石多呈块状构造。

团块状构造：黄铁矿或含少量黄铜矿等金属硫化物呈直径约为 1~3 cm 的团块，被同期灰白—烟灰色石英包围。

条带状—脉状构造：由晚期形成的矿脉呈条带状或脉状充填于早期矿脉裂隙或蚀变围岩中形成的构造类型，通常脉宽 1~5 cm。

网脉状构造：黄铁矿呈多条相互穿插的细脉分布于石英中构成网脉状构造。

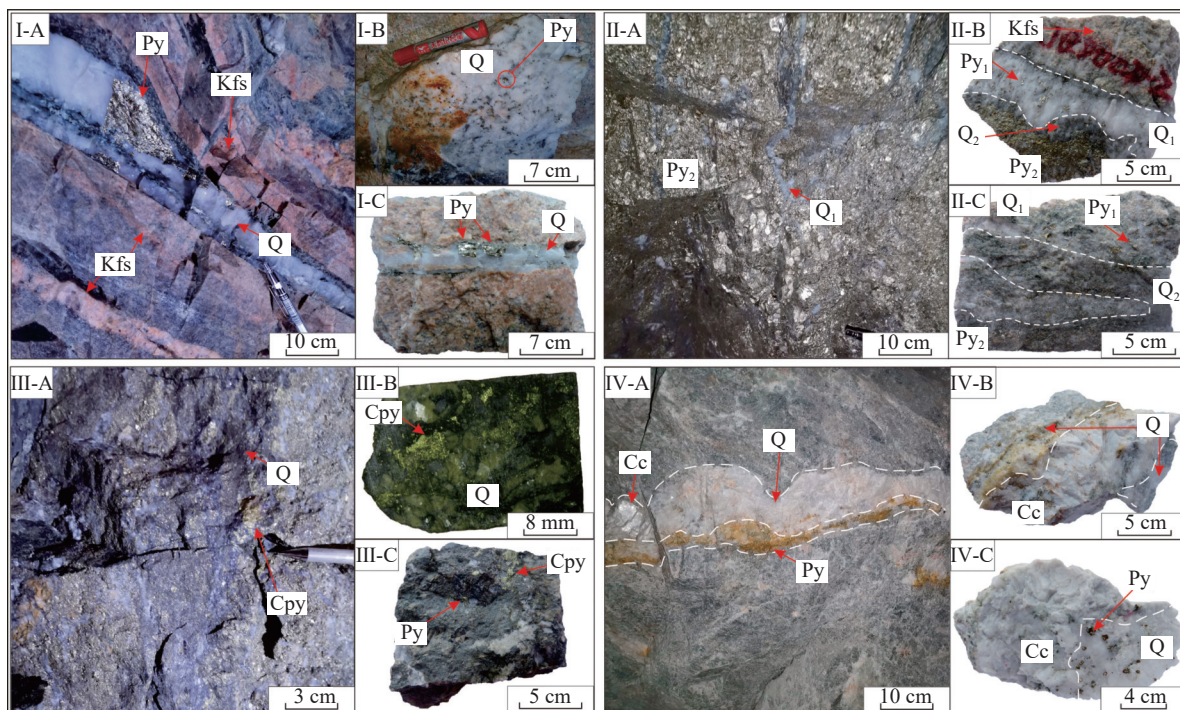
浸染状构造：中细粒黄铁矿均匀分布在石英中，构成浸染状构造。

梳状构造：成矿早期乳白色石英呈犬齿状，从裂隙两壁向内生长而成。

晶洞（晶簇）状构造：早期矿脉中常见有空洞，形成晶洞状构造，晶洞中多生长密集的石英晶芽，构成晶簇状构造。

2.3 围岩蚀变

金青顶金矿床内热液蚀变活动较强，围岩蚀变普遍发育，主要沿断裂及其两侧分布。从近矿到远矿，依次发育黄铁绢英岩化、绢英岩化和钾长石化蚀变现象，以断裂为中心近似呈对称带状分布（图 5）。钾长石化蚀变，由地表到深部，蚀变强度变大，局部出现膨大收缩的豆荚状构造特征；绢英岩化蚀变，在浅部较发育，深部反复尖灭再现；黄铁绢英岩化带宽度很窄，仅浅部独立成带产出^[16]。



(Py-黄铁矿; Ccp-黄铜矿; Cal-方解石; Kfs-钾长石; Q-石英)

图 5 各阶段岩矿井下及手标本特征

Fig.5 Each stage of the underground rock ore and hand specimen features

2.4 成矿期次与成矿阶段

根据脉体的穿插关系、矿石结构构造、矿物共生组合等特征，将热液成矿期划分为 4 个成矿阶段，分别是黄铁矿-石英阶段（S1）、石英-黄铁矿阶段（S2）、多金属硫化物阶段（S3）和石英-碳酸盐阶段（S4）。各矿化阶段发育程度不均匀，以前 2 阶段最为发育，S3 阶段发育相对较少，S4 阶段在深部较为发育。

黄铁矿-石英阶段（S1）：厚大的乳白色致密

块状石英脉（图 5-I），偶见少量黄铁矿。石英呈乳白色，晶体粗大；黄铁矿呈自形-半自形粗粒状，受后期构造应力作用的影响多发生碎裂。该阶段是金的早期成矿阶段，矿化较弱，未形成工业矿体，但形成了含金石英脉的主体。

石英-黄铁矿阶段（S2）：含块状和条带状黄铁矿的石英脉（图 5-II）。手标本上石英呈灰白色或烟灰色，它形粒状结构；黄铁矿集合体呈团块状、条带状、细脉状产于 S1 阶段的乳白色石英

中，或与 S2 阶段石英组成细脉。该阶段产生较为强烈的金富集矿化，是金矿形成过程的早期阶段，该阶段一般与 S1 阶段形成的石英脉相叠加，发育于石英脉的破碎地段。

多金属硫化物阶段（S3）：含浸染状或细（网）脉状黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等多金属硫化物。该阶段以形成较多的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿为特征。石英为无色透明-半透明，晶形较好，多呈自形-半自形；黄铁矿呈半自形-它形粒状。黄铜矿、方铅矿、闪锌矿多呈细脉状、它形粒状充填于黄铁矿的裂隙间，部分交代黄铁矿呈交代结构。该阶段为金矿化的主要成矿阶段，大

多独立形成多金属硫化物脉或叠加在前期破碎石英脉中，形成富矿体（图 5-III）。

石英-碳酸盐阶段（S4）：该阶段局部发育，接近成矿尾声，以碳酸盐（多为方解石）脉的出现为特征（图 5-IV）。碳酸盐脉多分布于石英脉的上下盘或脉体内，呈不规则团块状和脉状充填于裂隙中，该阶段基本不含金。

此外，处于地表或近地表环境下时，原生矿石发生表生氧化作用，黄铁矿氧化成褐铁矿，黄铜矿氧化形成孔雀石、蓝铜矿等。金青顶金矿床的矿物生成顺序见图 6。

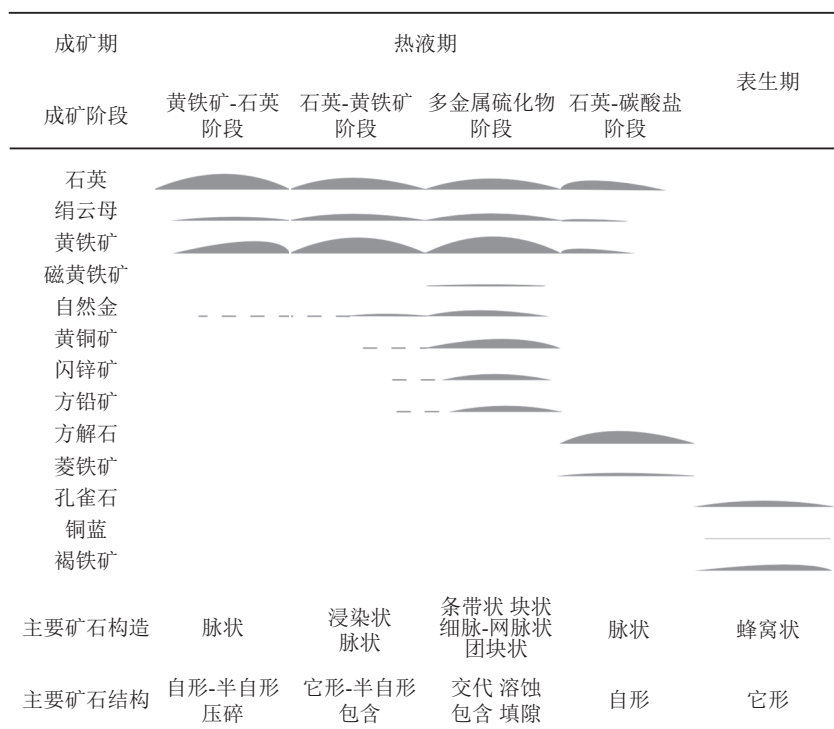


图 6 金青顶金矿床矿物生成顺序

Fig.6 Mineral generation sequence of Jinqingding gold deposit

3 样品采集与分析方法

本次研究样品主要来自金青顶金矿床 II 号矿体矿化石英脉或石英硫化物脉，对石英中的流体包裹体进行显微测温及并测试流体的 H-O 同位素。在金青顶金矿床-435 中段 25 线采场、-535 中段 24 线等采矿工程通道中系统采集具有代表性的样品共 33 件，将样品磨制成光片和探针片，利用偏光显微镜进行详细的矿相学观察，查明矿物的组成、结构构造以及共生关系。

流体包裹体测温在中国地质大学（武汉）流

体包裹体实验室完成。先将野外采集的样品磨制成 0.2~0.3 mm 厚度的包裹体片，以在镜下观察流体包裹体的岩相学特征，并进行镜下拍照。然后选择各阶段有代表性的原生包裹体进行显微测温。测温所用冷-热台为英国 Linkam 公司生产的 THMSG600 冷热台，测温过程中升降温速度为人为控制，液体包裹体先降温到 -80 ℃，纯 CO₂ 包裹体和含液体 CO₂ 包裹体降温到 -120 ℃ 至完全冻住，升降温速度一般为 20 ℃/min，在临近冰点升温速度降至 0.1 ℃/min，临近均一温度时升温速度

一般为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。流体包裹体后期数据处理中, 盐度计算是利用盐度计算方程 $W=1.78T_m-0.044\ 2T_m^2+0.000\ 557T_m^3$, 其中 W 表示盐度, T_m 表示冰点温度 ($^{\circ}\text{C}$) [17-18]。密度计算是利用 Flnconr 软件 (Brown & Lamb 公式) 得出。利用流体的均一温度和盐度估算金青顶金矿床的成矿压力与成矿深度, 其中: 成矿压力估算采用的经验公式为: 1) $p_1=p_0T_1/T_0$, 2) $p_0=219+2\ 620\ \text{N}$ 和 3) $T_0=374+920\ \text{N}$ [19], 式中 p_1 为成矿压力 ($10^5\ \text{Pa}$), p_0 为初始压力 ($10^5\ \text{Pa}$), T_1 为均一温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_0 为初始温度 ($^{\circ}\text{C}$), N 为流体盐度 (%); 成矿深度采用孙丰月等 [20] 据断裂带流体垂直分带模式 [21] 拟合的热液脉型金矿成矿深度公式计算: $H=0.086\ 8/(1/p+0.003\ 88)+2(40\leq p<220\ \text{MPa})$, 式中 H 为成矿深度 (km), p 为成矿压力 (MPa)。

H-O 同位素的测定在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行, 采用的是 MAT 253 稳定同位素质谱仪。先将石英样品粉碎到 $0.15\sim 0.25\ \text{mm}$, 在双目镜下挑选出纯度大于 99% 的石英样品, 用盐酸和等离子水清洗烘干。H 同位素测定是先利用真空爆裂法取水, 然后利用锌还原法获得氢气进行质谱测试, 采用的国际标准为 SMOW, δD 分析精度为 $\pm 2\text{‰}$ 。O 同位素测定是先先将样品与五氟化溴反应获得氧气, 然后在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时与纯碳棒反应制得 CO_2 进行质谱测试 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$, 利用转换方程式: $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}=1.030\ 86\times\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}+30.86$ 获得 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$, 分析精度为 $\pm 2\text{‰}$, 相对标准为 V-SMOW。

流体中的 H 同位素即为寄主矿物中的 H_2O 的 H 同位素, 流体中的 O 同位素数值由计算得来, 即使用石英-水分馏方程 $[1\ 000\ln\alpha=3.38\times 10^6T^{-2}-3.40]$ [22] 和同一样品石英流体包裹体均一温度平均值, 计算出不同成矿阶段的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值, 得到与石英氧同位素达到分馏平衡时水的氧同位素值。

4 结果及讨论

4.1 流体包裹体特征

4.1.1 流体包裹体岩相学

流体包裹体测温片来自于金青顶矿床内采集的矿石样品, 包含了全部 4 个成矿阶段的矿石, 共 20 个流体包裹体片。金青顶矿床的石英流体包裹体以原生包裹体为主, 分布不均匀, 多呈群

状、线状分布, 部分可见成沿石英生长环带呈带状分布或零星状分布, 各阶段包裹体大小较小, 多数不超过 $3\ \mu\text{m}$, 数量较多, 形态不规则, 分布密集, 说明断层的多期活动特征。成矿阶段主要捕获的流体包裹体类型为气液两相包裹体和水溶液包裹体, 各阶段可见少量含 CO_2 三相包裹体, 未见含 NaCl 或 KCl 子晶的多相包裹体。包裹体形态多规则, 也可见负晶型和不规则包裹体。各阶段包裹体特征分析如下:

(1) 黄铁石英阶段。富液两相包裹体为该成矿阶段的主要包裹体类型, 包裹体大小集中在 $2\sim 4\ \mu\text{m}$, 充填度在 $70\%\sim 80\%$ 区间内, 包裹体呈线状、孤立零星状分布; 含 CO_2 三相包裹体发育少见, 相比比例多集中在 $L_{\text{H}_2\text{O}}:L_{\text{CO}_2}:V_{\text{CO}_2}=5:3:2$ (图 7 A3)。

(2) 石英黄铁矿阶段。富液两相包裹体为改阶段的主要包裹体类型, 可见有含 CO_2 三相包裹体, 形状多为圆形、椭圆形或方型, 充填度集中在 $60\%\sim 80\%$, 包裹体呈群状、线状、孤立零星分布均有发育, 大小集中在 $2\sim 6\ \mu\text{m}$ (图 7 B2)。

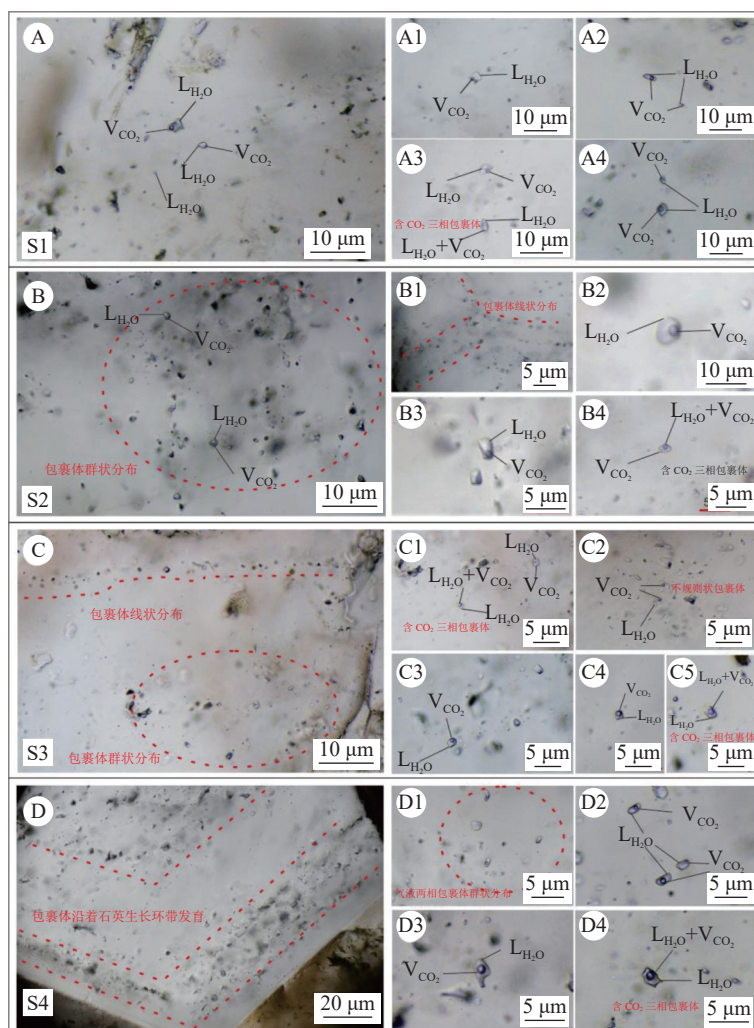
(3) 多金属硫化物阶段。该阶段矿床热液活动较剧烈, 流体包裹体数量发育较多。气液两相包裹体为主要包裹体类型, 充填度集中在 $60\%\sim 80\%$ 之间, 线状、群状、孤立零星包裹体类型均有发育 (图 7 C、图 7 C4), 包裹体大小集中在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

(4) 碳酸盐阶段。该阶段包裹体类型多发育气液两相包裹体, 可见包裹体沿石英成长环带, 表明原生包裹体与石英矿物同时发育 (图 7 D), 包裹体大小集中在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$, 充填度在 $60\%\sim 90\%$ 之间, 发育较少含 CO_2 三相包裹体 (图 7 D4)。

4.1.2 流体包裹体热力学分析

黄铁矿-石英阶段 (S1) 石英包裹体大小集中在 $2\sim 4\ \mu\text{m}$, 充填度多集中在 $70\%\sim 80\%$ 之间。测温结果显示, 气液两相包裹体的冰点集中在 $-6.6\sim -8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 均值 $-7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 加热过程中均一到液相, 均一温度介于 $123.4\sim 305.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 8 S1), 平均为 $252.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 计算获得盐度介于 $7.58\%\sim 11.81\%\ \text{NaCl}$, 平均值 $9.18\%\ \text{NaCl}$; 密度介于 $0.84\sim 0.89\ \text{g}/\text{cm}^3$ 之间, 平均值 $0.87\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。成矿压力为 $53.6\sim 86.4\ \text{MPa}$, 平均为 $67.3\ \text{MPa}$ 。

石英黄铁矿阶段 (S2) 石英包裹体大小集中



A: 黄铁矿-石英阶段的石英; Q2: 石英-黄铁矿阶段中的石英; Q3: 多金属硫化物阶段中的石英; Q4: 碳酸盐阶段的石英; A1-A4为黄铁矿-石英阶段石英中的包裹体; B1-B4为石英-黄铁矿阶段石英中的包裹体; C1-C5为多金属硫化物阶段石英中的包裹体; D1-D3为石英-多金属硫化物阶段石英中的包裹体 LH₂O: 液态水; VH₂O: 气态水; LCO₂: 液态二氧化碳; VCO₂: 气态二氧化碳。

图7 金青顶矿床流体包裹体显微特征

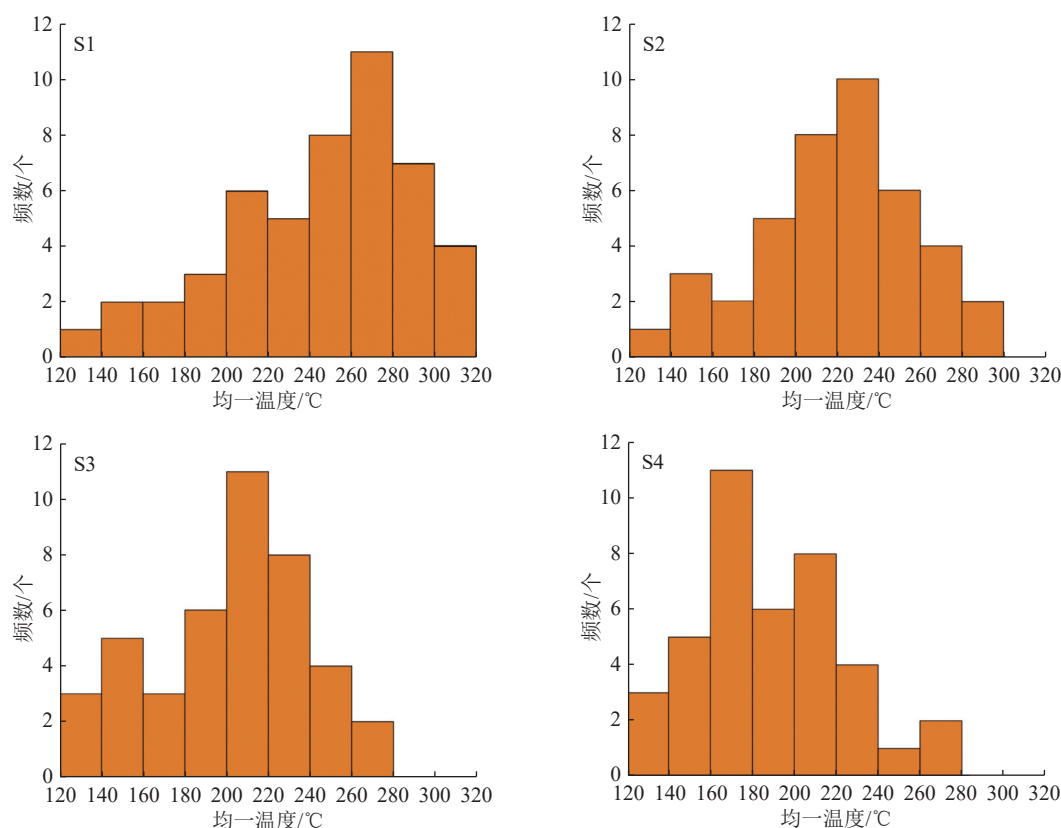
Fig.7 Microscopic characteristics of fluid inclusions in Jinqingding deposit

在 2~6 μm , 充填度集中在 60%~80% 之间。测温结果显示, 气液两相包裹体的冰点集中在 -0.6~2.1 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 均值 -2.4 $^{\circ}\text{C}$; 加热过程中均一到液相, 均一温度介于 127.6~291.5 $^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 8 S2), 平均值 219.7 $^{\circ}\text{C}$ 。计算获得盐度介于 1.74~7.02% NaCl 之间, 平均值 4.23% NaCl; 密度介于 0.82~1.01 g/cm^3 之间, 平均值 0.91 g/cm^3 。成矿压力为 43.6~76.4 MPa, 平均为 61.2 MPa。

多金属硫化物阶段 (S3) 石英包裹体大小集中在 2~5 μm , 充填度集中在 60%~80% 之间。测温结果显示, 气液两相包裹体的冰点集中在 -2.1~-9.6 $^{\circ}\text{C}$, 均值 -4.8 $^{\circ}\text{C}$; 加热过程中均一到液相, 均一温度介于 120.6~274.2 $^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 8 S3), 平

均值 202.9 $^{\circ}\text{C}$, 计算获得盐度介于 3.5%~13.5% NaCl 之间, 平均值 7.5% NaCl; 密度介于 0.83~0.98 g/cm^3 之间, 平均值 0.92 g/cm^3 。成矿压力为 41.3~67.4 MPa, 平均为 54.3 MPa。

碳酸盐阶段 (S4) 石英包裹体大小集中在 2~5 μm 之间, 充填度集中 60%~90% 之间。测温结果显示, 气液两相包裹体冰点集中在 -13.2~1.3 $^{\circ}\text{C}$, 均值 -7.51 $^{\circ}\text{C}$; 加热过程中均一到液相, 均一温度介于 123.5~262.6 $^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 8 S4), 平均均一温度 188.7 $^{\circ}\text{C}$, 计算获得盐度介于 2.24%~17.07% NaCl 之间, 平均值 10.71% NaCl; 密度介于 0.95~1.08 g/cm^3 之间, 平均值 0.99 g/cm^3 。成矿压力为 39.8~56.4 MPa, 平均为



S1: 黄铁矿-石英阶段; S2: 石英-黄铁矿阶段; S3: 多金属硫化物阶段; S4: 碳酸盐阶段

图 8 金青顶矿床石英包裹体各阶段测温数据

Fig.8 Temperature measurement data of quartz inclusion in Jinqingding deposit at different stages

48.9 MPa。

根据四个阶段的实验结果显示,金青顶石英包裹体的温度变化范围较大,集中再在 160~280 °C 之间,主成矿期的温度主要集中于 200~300 °C 之间,而且从岩体到矿体其形成温度和压力都降低,密度逐渐升高,金青顶矿床成矿流体属于低盐度流体(低于 26.3% NaCl),成矿阶段早期阶段流体盐度相对较高,主成矿期的盐度相对较低,后期逐渐升高。

以上数据表明金青顶矿床成矿环境为岩浆期后中温、中浅成条件,分析流体包裹体均一温度与流体盐度、密度、成矿压力的关系表明,本区流体包裹体均一温度与盐度关系不明显;均一温度与流体密度呈反相关关系;流体盐度与密度呈正相关关系

成矿深度估算结果为 5.567~6.632 km。反映出中浅成成矿作用的特点,这与金青顶金矿矿石中可见晶洞/晶簇构造(图 4-o)的地质事实相符。前人对牟乳成矿带内的三佛山岩体(118~113 Ma)^[23-24]

(开展磷灰石、锆石裂变径迹和绿帘石压力计法研究,得出其剥蚀深度为 3.5~6.0 km^[25-26],这与本文估算的成矿深度大体相当。从成矿早阶段到晚阶段,成矿压力与成矿深度均有逐步变小的趋势,这可能与早白垩世(140~110 Ma)^[27-28]西太平洋板块俯冲引起的胶东半岛地壳隆起有关。

4.2 氢氧同位素

金青顶金矿床不同成矿阶段共 8 件样品的 δD 值介于 -96.0‰~81.8‰ 之间,平均值 -86.65‰; δO_{V-SMOW} 值介于 0.70‰~6.32‰ 之间,平均值 4.08‰(表 1)。根据前人金青顶流体包裹体显微测温数据反映^[29-30],矿床成矿热液普遍存在流体不混溶,而平衡温度更接近矿床的成矿温度,取各成矿阶段均一温度峰值,可得成矿 I 阶段流体的 δD 分别为 -85.6‰ 和 -85.3‰, $\delta^{18}O$ 为 5.57‰、6.32‰;成矿 II 阶段流体的 δD 分别为 -94.7‰ 和 -83.2‰, $\delta^{18}O$ 为 5.58‰、3.06‰;成矿 III 阶段流体的 δD 分别为 -84.5‰ 和 -96.0‰, $\delta^{18}O$ 为 4.82‰、5.12‰;成矿 IV 阶段流体的 δD 分别为 -82.1‰ 和

-81.8.0‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.70‰、1.48‰。

表 1 金青顶矿床氢氧同位素组成
Table 1 Hydrogen and oxygen isotopic composition of
Jinqingding deposit

样品编号	成矿 阶段	岩石/ 矿物	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	资料 来源
JQD1-1-1	S1	石英	-85.6	5.57	本文
JQD1-1-2		石英	-85.3	6.32	
JQD1-2	S2	石英	-94.7	5.58	
JQD4-4		石英	-83.2	3.06	
JQD2-2	S3	石英	-84.5	4.82	
JQD2-3		石英	-96.0	5.12	
JQD4-3	S4	石英	-82.1	0.70	
JQD4-6		石英	-81.8	1.48	
焦家		石英	-62	7.25	
焦家		石英	-59	7.75	
焦家		石英	-59	5.25	文献[31-32]
焦家		石英	-86	4.37	
焦家		石英	-85	4.17	
焦家		石英	-58	7.2	
焦家		石英	-54	7.2	
焦家		石英	-76	4	
焦家		石英	-85	4.2	
焦家		石英	-64	6.1	
玲珑		石英	-67.5	5.7	
玲珑		石英	-57.91	1.45	
玲珑		石英	-67.53	5.04	
蓬家夼		石英	-89.9	0.61	
蓬家夼		石英	-92	0.85	
蓬家夼		石英	-97.9	0.59	
蓬家夼		石英	-96.6	1.02	
蓬家夼		石英	-58	1.15	
蓬家夼		石英	-59	1.95	
蓬家夼		石英	-64	2.15	

氢氧同位素示踪是用于研究成矿流体来源最常见的手段之一，前人利用该方法有效限定了多种成因矿床的成矿流体来源。金青顶金矿床成矿流体可能由变质水、岩浆水、大气降水几种热液的混合作用形成，将成矿流体的氢氧同位素组成同自然界不同成因水的同位素组成进行对比。在 H-O 同位素研究中，从矿床成矿阶段 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}\sim\delta\text{D}\text{‰}$ 分布图可以看出，金青顶金矿床的氢氧同位素投点均落在原生岩浆水和变质水与雨水线之间，且金青顶金矿床与大量胶东金矿的成矿流体的氢、氧同位素组成相似，均介于岩浆水或变质水与大

气降水区域之间（图 9）。

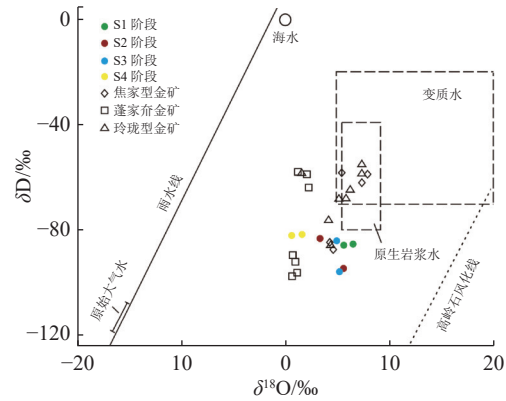


图 9 金青顶矿床成矿流体 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}\sim\delta\text{D}\text{‰}$ 分布
Fig.9 Metallogenic fluid of Jinqingding deposit
 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}\sim\delta\text{D}\text{‰}$ distribution

前人对胶东区域岩石和流体的氢氧同位素已开展大量研究，可选取部分研究成果作为金青顶金矿床的氢氧同位素地球化学背景值。陈振胜等通过[33]选取胶东群变质岩岩性样品开展研究，给出胶东群变质岩的氢氧同位素背景值为 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}=5.1\text{‰}\sim 11.3\text{‰}$ ，平均值为 8.2‰ ， $\delta\text{D}\text{‰}=-96\text{‰}\sim -81\text{‰}$ ；安家桐等[34]测得牟乳成矿带邓格庄中粗粒花岗岩 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 平均值 $+9.2\text{‰}$ ， $\delta\text{D}\text{‰}$ 平均值 -72.5‰ ，邓格庄似斑状二长花岗岩 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 平均值 $+9.67\text{‰}$ ， $\delta\text{D}\text{‰}$ 平均值 -72.8‰ 。

实验数据显示，金青顶金矿的成矿流体 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值明显低于区域的岩浆水和变质水，表明成矿作用不可能只是单一的岩浆水与变质水混合，大气降水的混合参与到成矿热液演化过程中，特别是第四阶段向着大气降水方向偏移较明显。

成矿流体从深部向地表上升过程中是一个热液压力逐渐降低的过程，金青顶金矿床矿体严格受断裂构造控制，成矿热液涌入断裂构造中，由于热液运移通道容积的增加，加速了降压速率，当流体的压力低于流体的饱和气体压力时，在构造减压的背景下流体发生沸腾作用。金青顶矿床具有流体包裹体显微测温结果具有多峰性、在成矿阶段（S3）包裹体均一温度降低而盐度却升高、气液比相差很大的包裹体视域内共生且均一温度接近等现象，大气降水的混合等特征都揭示成矿热液沸腾作用的发生。沸腾作用直接导致成矿热液中 CO_2 等酸性氧化物气体挥发，使得成矿热液中 pH 值升高，促进成矿物质的沉淀。同时沸腾作用后的降温效应也使得成矿物质溶解度降

低, 有利于矿床矿体的形成。与此同时, 含铁、铜等金属元素的围岩与含硫的流体连续反应形成黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物沉淀下来^[35-36]。成矿热液沉淀的过程很好的解释金青顶矿床矿体严格受断裂控制的野外地质现象, 沸腾作用使得矿床在短时间内大量沉淀, 沿着构造断裂形成矿体。

4.3 成矿作用

综合前述对成矿地质背景、矿床地质特征、成矿流体等分析结果, 结合前人研究成果以及研究区矿床自身特点, 总结其成矿背景及矿床成因如下。

晚侏罗世, 岩石圈减薄及软流圈上涌的一系列壳幔作用造成加厚下地壳重熔, 在胶东地区形成一系列岩浆作用。早白垩世, 岩石圈与软流圈作用强度逐渐增大, 软流圈物质参与成岩比例增加, 形成以郭家岭岩体为代表的中酸性岩体及中基性脉岩群。在距今 120 Ma^[27,37] 左右, 受太平洋板块俯冲状态改变的影响, 郯庐深大断裂性质由压扭性向引张性改变^[38-39]。古老岩石圈地幔被交代形成富集地幔, 富集地幔岩浆上涌, 造成地壳物质局部熔融形成岩浆, 地幔岩浆继续进入地壳岩浆中形成混合岩浆房。地壳岩浆与幔源岩浆的混合形成了大量成矿物质, 同时由于富集地幔的熔融加入, 大量含金组分进入到混合岩浆流体中, 混合岩浆房演化形成的中基性岩浆熔体沿侵位转换构造带快速向上运移, 后沿着郯—庐断裂带次级断裂运移, 运移至牟乳地区。

早期, 断裂构造的开放性有限, 成矿流体沿断裂构造运移, 因而与围岩的交代范围较大, 形成大面积的钾化。随着流体温度、盐度、氧逸度降低, 流体对围岩的交代作用则以绢英岩化、黄铁矿化和金矿化为主。中后期, 断裂构造开放程度加大后, 进入主成矿阶段, 流体进入断裂易容矿部位充填成矿, 同时由于流体密度、温度、氧逸度等物理化学条件的变化, 以及伴随大气降水的混入等, 导致金开始逐步大量沉淀。后期流体性质的改变以及幔源组分的持续加入导致多金属矿物的出现, 最终形成产出受断裂控制和垂向延深金矿体。碳酸盐矿物主要出现于成矿中晚期阶段中, 区别于变质成因金矿床, 具有独特的成矿特点。

5 结 论

(1) 详细的野外地质调查和岩矿分析把金青顶

金矿床划分为四个成矿阶段, 分别是黄铁矿-石英阶段、石英-黄铁矿阶段、多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段, 其中第二和三阶段为主要成矿阶段。

(2) 金青顶金矿床的流体包裹体以气液两相包裹体和纯液相水溶液包裹体为主, 其均一温度主要在 188.7~252.1 °C, 盐度大多为 4.23%~10.71%, 密度集中于 0.87~0.99 g/cm³, 成矿压力主要位于 48.9~67.3 MPa, 成矿深部 5.6~6.63 km, 具有中低温、低盐度、低密度、中浅成矿床。

(3) 根据氢、氧同位素特征, 金青顶金矿床成矿流体来源主要为岩浆水和变质水的混合, 随着成矿作用的进行, 大气降水逐渐混入成矿流体, 随着成矿作用进行, 温度、压力逐渐降低, 流体降温 and 流体不混溶是矿床成矿物质短时间内大量沉淀的主要机制。

参考文献:

- [1] YANG L Q, DENG J, WANG, Z L, et al. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China: implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment[J]. *Economic Geology*, 2016, 111(1):105-126.
- [2] YANG L Q, DENG J, et al. Ore-forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Gold Province, China[J]. *Resource Geology*, 2009, 59(2):181-193.
- [3] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9):2447-2467.
YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al. Mesozoic gold mineralization system in Jiaodong[J]. *Journal of Petrology*, 2014, 30(9):2447-2467
- [4] 陈衍景, Franco PIRAJNO, 赖勇, 等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004(4):907-922.
CHEN Y J, FRANCO PIRAJNO, LAI Y, et al. Time and tectonic environment of large-scale mineralization in Jiaodong ore concentration area[J]. *Journal of Petrology*, 2004(4):907-922
- [5] David I. Groves, M. Santosh. The giant Jiaodong gold province: The key to a unified model for orogenic gold deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(3):409-417.
- [6] Richard J. Goldfarb, M. Santosh. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique[J]. *Geoscience*.

Frontiers, 2014, 5(2):139-153.

[7] 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8):1153-1168+1-4.

ZHU R X, FAN H R, LI J W, et al. Craton destructive gold deposit[J]. Chinese Science: Geoscience, 2015, 45(8):1153-1168+1-4.

[8] LIN L, LI S R, et al. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold deposits: insights from the Jiaodong peninsula, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 130.

[9] 祝德成, 许庆林, 吕大炜, 等. 牟乳成矿带北段邓格庄金矿煌斑岩与金矿成矿关系[J]. 地球学报, 2018, 39(3):319-328.

ZHU D C, XU Q L, LYV D W, et al. The relationship between lamprophyre and gold mineralization of Dungezhuang gold deposit in the north section of Mourumetallogenic belt[J]. Journal of Geosciences, 2018, 39(3):319-328.

[10] 沈保丰, 骆辉. 华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1994(1):87-96.

SHEN B F, LUO H. Metallogenic characteristics of gold deposits in the Archean greenstone belt of the North China platform[J]. North China Journal of Geology and Mineral Resources, 1994(1):87-96

[11] 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 等. 山东蓬家夼金矿硫铅碳氧同位素地球化学[J]. 矿物学报, 2002(3):255-260.

ZHANG L C, SHEN Y C, LIU T B, et al. Sulfur, lead, carbon and oxygen isotope geochemistry of Pengjiakuang gold deposit, Shandong[J]. Journal of Minerals, 2002(3):255-260.

[12] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 等. 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[J]. 岩石学报, 2005(5):1317-1328.

FAN H R, HU F F, YANG J H, et al. Fluid evolution and large-scale gold mineralization during the transition of Mesozoic tectonic system in Jiaodong[J]. Journal of Petrology, 2005(5):1317-1328.

[13] 张运强, 李胜荣, 陈海燕, 等. 胶东金青顶金矿床成矿流体来源的黄铁矿微量元素及 He-Ar 同位素证据[J]. 中国地质, 2012, 39(1):195-204.

ZHANG Y Q, LI S R, CHEN H Y, et al. Evidence of trace elements and He-Ar isotopes of pyrite from the ore-forming fluid source of the Jinqingding gold deposit in Jiaodong[J]. China Geology, 2012, 39(1):195-204

[14] Chen Bing han, Jun Deng, Hantao Wei, et al. Trace Element Geochemistry in Quartz in the Jinqingding Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for the Gold

Precipitation Mechanism[J]. Minerals, 2019, 9(5):112-125

[15] 侯建华, 任天龙, 王来明, 等. 胶东地区晚侏罗世玲珑期花岗岩[J]. 山东国土资源, 2021, 37(9):1-11.

HOU J H, REN T L, WANG L M, et al. Late Jurassic Linglong granite in Jiaodong area[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(9):1-11.

[16] 陈海燕, 李胜荣, 张秀宝, 等. 胶东金青顶金矿床围岩蚀变特征与金矿化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(1):5-13.

CHEN H Y, LI S R, ZHANG X B, et al. Wall rock alteration characteristics and gold mineralization of Jinqingding gold deposit in Jiaodong[J]. Bulletin of Mineral and Rock Geochemistry, 2012, 31(1):5-13.

[17] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. Econ Geol, 1988, 83(1):197-202.

[18] Bodnar B J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions[J]. Geochemi Cosmochem Acta, 1993, 57(3):683-684.

[19] 邵洁涟, 梅建明. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J]. 矿物岩石, 1986, 6(3):103-110.

SHAO J L, MEI J M. Study on the typomorphic characteristics of mineral inclusions of gold deposits in volcanic rock areas in Zhejiang Province and their genesis and prospecting significance[J]. Mineral and Rock, 1986, 6(3):103-110.

[20] 孙丰月, 金巍, 李碧乐, 等. 关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(S1):27-30.

SUN F Y, JIN W, LI B L, et al. Thinking on the mineralization depth of vein hydrothermal gold deposits[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(S1):27-30.

[21] Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposit[J]. Geology, 1988, 16(6):551-555.

[22] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77:3057-3607.

[23] 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 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[J]. 岩石学报, 2005, 21(4):1281-1301.

GUO J H, CHEN F K, ZHANG X M, et al. Mesozoic magmatic intrusion and syn-collision-post-collision tectonic process in the northern part of the Sulu ultrahigh pressure zone:

- zircon U-Pb chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4):1281-1301.
- [24] Goss S C, Wilde S A, Wu F, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. *Lithos*, 2010, 120(3/4):309-326.
- [25] 赵富远. 胶东三佛山早白垩世花岗岩磷灰石、锆石裂变径迹研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- ZHAO F Y. Study on the fission track of apatite and zircon from the early Cretaceous granite in Sanfo, Jiaodong [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [26] 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 等. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(2):285-295.
- ZHANG H F, LI S R, ZHAI M G, et al. Early Cretaceous crustal uplift and denudation in Jiaodong Peninsula and its dynamic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2):285-295
- [27] 田瑞聪, 李大鹏, 张文, 等. 胶北隆起中生代壳幔岩浆的混合反应是巨量金质来源的关键[J]. *岩石学报*, 2022, 38(1):23-40.
- TIAN R C, LI D P, ZHANG W, et al. The mixing reaction of Mesozoic crust-mantle magma in Jiaobei Uplift is the key to the huge amount of gold source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(1):23-40.
- [28] 郭云成, 段留安, 韩小梦, 等. 胶东前垂柳金矿区花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2022(3):876-897.
- GUO Y C, DUAN L A, HAN X M, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of granites in the Qianchuli gold deposit, Jiaodong, and their geological significance[J]. *Modern Geology*, 2022(3):876-897.
- [29] Qiu K F, Taylor R D, et al. Geologic and geochemical insights into the formation of the Taiyangshan porphyry copper-molybdenum deposit, western Qinling Orogenic Belt, China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35:40-58.
- [30] Qiu K F, Marsh E, et al. Fluid and metal sources of the Wenquan porphyry molybdenum deposit, Western Qinling, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86:459-473.
- [31] 程伟, 瞿友兰, 田秀林, 等. 胶西北焦家式和玲珑式金矿的形成机理[J]. *山东国土资源*, 2011, 27(3):1-7+12.
- CHENG W, QU Y L, TIAN X L, et al. The formation mechanism of Jiaojia-style and Linglong-style gold deposits in northwestern Jiaoxi[J]. *Shandong Land and Resources*, 2011, 27(3):1-7+12.
- [32] 胡换龙, 姜晓辉, 梁改忠, 等. 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(6):1345-1356.
- HU H L, JIANG X H, LIANG G Z, et al. Vertical variation characteristics of ore-forming fluid in Jiaojia gold deposit and its implications for gold mineralization process in Jiaodong[J]. *Bulletin of Mineral and Rock Geochemistry*, 2021, 40(6):1345-1356.
- [33] 陈振胜, 张理刚, 刘敬秀, 等. 胶东金成矿区岩石氧氢同位素地球化学背景初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 1995(3):211-218.
- CHEN Z S, ZHANG L G, LIU J X, et al. Preliminary study on the geochemical background of oxygen and hydrogen isotopes of rocks in JiaodongJincheng mining area[J]. *Journal of Rock Mineralogy*, 1995(3):211-218
- [34] 安家桐, 丁东斌. 山东牟平-乳山地区金矿控矿条件的研究. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集(5) 胶东地区[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- AN J T, DING D B. Study on the ore-controlling conditions of gold deposits in the Mouping-Rushan area of Shandong Province. Collected works on the main types of gold deposits in China and regional metallogenic conditions(5) Jiaodong area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [35] 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 等. 焦家式金矿水-岩交换作用—成矿流体氢氧同位素组成研究[J]. *矿床地质*, 1994(3):193-200.
- ZHANG L G, CHEN Z S, LIU J X, et al. Water rock exchange of Jiaojia-style gold deposit - study on hydrogen and oxygen isotope composition of ore-forming fluid[J]. *Deposit Geology*, 1994(3):193-200.
- [36] 李旭芬, 刘建朝, 张学仁, 等. 牟平—乳山金矿带构造特征及成矿预测[J]. *黄金科学技术*, 2013, 21(3):10-15.
- LI X F, LIU J C, ZHANG X R, et al. Structural characteristics and metallogenic prognosis of the Mouping-Rushan gold belt[J]. *Gold Science and Technology*, 2013, 21(3):10-15.
- [37] 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定[J]. *科学通报*, 2004, 49(12):1191-1198.
- HU F F, FAN H R, YANG J H, et al. Metallogenic age of gold-bearing quartz vein type gold deposit in Rushan, Jiaodong: U-Pb determination by hydrothermal zircon SHRIMP method[J]. *Science Bulletin*, 2004, 49(12):1191-1198.
- [38] 朱日祥, 孙卫东. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(9):1444-1456.

ZHU R X, SUN W D. Mantle wedge and cratonic destruction type gold deposit[J]. Science of China: Earth Science, 2021, 51(9):1444-1456.
[39] 陈炳翰. 牟乳金矿带成矿作用地球化学[D]. 北京: 中国

地质大学(北京), 2017.

CHEN B H. Mineralization geochemistry of the Mouru gold belt [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.

Characteristics of Ore-forming Fluid and Mineralization of Jinqingding Gold Deposit in Mouru Metallogenic Belt, Jiaodong

SONG Qian¹, HUANG Xin^{1,2,3}, WANG Yongjun^{1,2,3}, SHAO Yubao^{1,3}, LU Changyong^{1,3}, LI Silong^{1,3}

(1. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, Shandong, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 3. Key Laboratory of Hidden Hazards Assessment, Prevention and Control of Non-coal Mines, Emergency Management Department of Shandong Province, Jinan 250104, Shandong, China)

Abstract: The Mouru Gold Metallogenic Belt is one of the three major one in the Jiaodong Gold Metallogenic Zone. The Jinqingding Gold Deposit is located in the southern part of the metallogenic belt and is a large quartz vein-type gold one. The research on its ore-forming fluid is still controversial. This paper starts from the study of fluid inclusions and H-O isotopes in ore quartz, combined with the geological characteristics of the deposit to discuss the ore-forming fluid and ore-forming process. Petrographic study on fluid inclusions in ore quartz showed that the primary inclusions were mainly two-phase gas-liquid inclusions and pure liquid-phase aqueous solution inclusions, with a small amount of CO₂ three-phase inclusions. Microthermometric results and calculations showed that the homogenization temperature was mainly between 188.7 and 252.1 °C, the salinity was mainly between 4.23% and 10.71%, the density was concentrated between 0.87 and 0.99 g/cm³, the ore-forming pressure was mainly between 48.9 and 67.3 MPa, and the ore-forming depth was between 5.6 and 6.63 km. With the ore-forming process, the temperature, pressure gradually decreased, and the density gradually increased. H-O isotope tests showed that δD values were mainly between -96.0‰ and -83.2‰, and $\delta^{18}O$ values were mainly between 3.06‰ and 5.58‰. The ore-forming fluid was mainly derived from the mixture of magmatic and metamorphic water, and the cooling and non-mixing of the fluid were the main mechanisms for the large-scale precipitation of ore-forming materials in a short time. It is concluded that the Jinqingding gold deposit should belong to the hydrothermal vein-type gold deposit with characteristics of medium-low temperature, low salinity, low density and medium-shallow formation.

Keywords: Jiaodong; Deposit characteristics; Fluid inclusions; Metallogenesis; Jinqingding gold deposit; Mouru metallogenic belt