李斌,臧兴运,王永胜,等.夹皮沟成矿带小北沟金矿床成矿流体特征及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1575-1591.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230243.

Li Bin,Zang Xingyun,Wang Yongsheng,et al. Characteristics and Geological Significance of Ore-Forming Fluids in Xiaobeigou Gold Deposit of the Jiapigou Metallogenic Belt. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(5):1575-1591.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230243.

夹皮沟成矿带小北沟金矿床成矿流体特征及其地质意义

李 斌[1,2],臧兴运[1,2],王永胜[2],刘振宇[2],苏 斌[2],闫 冬[2]

1.山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队/深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心/自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心,山东 威海 264209

2.吉林省地质调查院,长春 130102

摘要:小北沟金矿床地处夹皮沟成矿带中部,为石英脉-蚀变岩型金矿床。矿区赋矿围岩主要为高角闪岩-麻粒岩相斜长角闪岩,含金石英脉呈小而不连续的平行细脉或透镜体状产于NW向叠加于早期韧性剪切带之上的次级脆性剪切裂隙之中,其上、下盘旁侧及尖灭处发育少量低品位蚀变岩型(蚀变糜棱岩、片糜岩)矿体。主成矿阶段流体包裹体研究表明,矿石中石英主要发育CO_2、富CO_2、含CO_2及气液两相四种类型原生流体包裹体,测温结果显示包裹体均一温度为226.8~362.5 ℃,盐度(w(NaCl))为3.57%~11.95%,密度为0.65~0.91 g/cm^3;成矿流体总体属中低温、中低盐度和低密度的富CO_2的CO_2-H_2O-NaCl体系,成矿压力为70~206 MPa,成矿深度约为9.8 km。包裹体O同位素$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为10.8‰~11.3‰,H同位素$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为-102.8‰~-96.7‰,C同位素$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$值为-20.6‰~-8.3‰,反映主成矿阶段成矿流体来源具幔源属性。矿石中CO_2和富CO_2包裹体CO_2相均一温度为-24.7~26.6 ℃,明显低于邻近其他矿床(如三道岔金矿床为21.9~29.7 ℃,二道沟金矿床为23.8~30.9 ℃等),暗示其成矿深度较深。小北沟金矿床的地质、流体包裹体和H-O-C同位素特征共同揭示该矿床属于中温热液脉型金矿床,处于深大断裂的脆性区构造层次向韧脆性区构造层次过渡部位,深部仍应有一定的进一步找矿前景,但矿石类型可能由石英脉型转为构造蚀变岩型或蚀变糜棱岩型。

关键词:成矿流体;流体包裹体;H-O-C同位素;中温热液脉型金矿;小北沟金矿床;夹皮沟成矿带

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230243 **中图分类号**:P618.51;P59 **文献标志码**:A

收稿日期:2023-10-10

作者简介:李斌(1988—),男,工程师,硕士,主要从事区域地质、成矿规律与预测等方面的研究,E-mail:53791239@qq.com

通信作者:臧兴运(1969—),男,研究员,硕士,主要从事区域地质、成矿规律与隐伏矿体预测等方面的研究,E-mail:zangxingyun01@163.com

基金项目:深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心项目(SDK202219);自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心项目(LDKF-2023BZX-25);中国地质调查局项目(DD20190379)

Supported by the Project of Engineering Research Center of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration,Shandong Province (SDK202219), the Project of Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, Ministry of Natural Resources (LDKF-2023BZX-25) and the Project of China Geological Survey (DD20190379)

Characteristics and Geological Significance of Ore-Forming Fluids in Xiaobeigou Gold Deposit of the Jiapigou Metallogenic Belt

Li Bin[1,2], Zang Xingyun[1,2], Wang Yongsheng[2], Liu Zhenyu[2], Su Bin[2], Yan Dong[2]

1. *No.6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources/Shandong Engineering Research Center of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration/Ministry of Natural Resources Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploraion and Mining, Weihai* 264209, *Shandong, China*
2. *Geological Survey of Jilin Province, Changchun* 130102, *China*

Abstract: The Xiaobeigou gold deposit is located in the middle of Jiapigou metallogenic belt and is a quartz vein-altered rock type gold deposit. The ore-bearing surrounding rock of the mining area is mainly high amphibolite and granulite facies plagioclase amphibolit. The gold-bearing quartz veins are small, discontinuous parallel veins or lenticular bodies found within secondary brittle shear fractures superimposed on an early ductile shear zone trending NW. There are also some low-grade altered rock type orebodies (altered mylonite and gylite) developed on the sides of the upper and lower plates, and at the apex. The study of fluid inclusions from the main ore-forming stage shows four types of primary fluid inclusions: CO_2, CO_2-rich, CO_2-containing and gas-liquid two phases. The homogenization temperatures range from 226.8 to 362.5 ℃, with salinity w(NaCl) between 3.57% and 11.95%, and density of 0.65 to 0.91 g/cm^3. The ore-forming fluid generally belongs to the CO_2-H_2O-NaCl system, characterized by low temperature, low salinity and low density. The ore-forming pressure ranges from 70 to 206 MPa, corresponding to a depth of about 9.8 km. The $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ composition of the O isotope ranges from 10.8‰ to 11.3‰, while $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ value of the H isotope show values of −102.8‰ to −96.7‰, and the $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ values of the C isotope are between −20.6‰ and −8.3‰, indicating that the ore-forming fluid source of the main ore-forming stage is of mantle origin. The homogenization temperature of CO_2 and CO_2-rich inclusions are notably lower at −24.7 to 26.6 ℃ compared to other nearby deposits (such as Sandaocha gold deposit of 21.9 to 29.7 ℃, Erdaogou gold deposit of 23.8 to 30.9 ℃, etc.), suggesting a deeper mineralization. The geological, fluid inclusions and H-O-C isotopic characteristics of Xiaobeigou gold deposit indicate it is a medium-temperature hydrothermal vein type gold deposit, transitioning from the brittle zone to the deep ductile-brittle zone. There remains potential for further deep exploration, though the ore type may change from quartz vein type to tectonic-altered rock type or tectonic-altered mylonite type.

Key words: ore-forming fluid; fluid inclusions; H-O-C isotopes; mesothermal vein gold deposit; Xiaobeigou gold deposit; Jiapigou metallogenic belt

0 引言

吉林夹皮沟金成矿带地处华北克拉通北缘东段,北西起于桦甸市大砬子一带,东南延至夹皮沟镇以南,为一长约 60 km、宽为 4～10 km 的 NW—SE 向弧形金成矿带,矿带内陆续探明大型金矿床两处(夹皮沟、三道岔),中型金矿床四处(板庙子、四道岔、二道沟、八家子),小型矿床和矿点近百余处,是国内最主要的产金地之一[1-2]。伴随矿山开采对已探明资源储量的不断消耗,找寻接替资源任务紧迫。尽管前人已从成岩成矿年代学[3-6]、构造地质学[7-9]、岩石地球化学[10-12]、流体包裹体[13-15]、同位素地球化学[16]等方面对成矿带上典型金矿床进行了大量研究,取得了一系列重要的研究成果,但有关成矿带上金矿床的矿床成因类型和成矿流体来源仍存有较大分歧。成矿流体来源方面,有变质流体成

矿[17]、幔源或壳源岩浆流体与大气降水混合[11,13]之说；而矿床类型方面，则有绿岩带型金矿床[17-18]、热液脉型金矿床[12,14]、造山型金矿床[19]等不同观点。此外，北西向大砬子—夹皮沟断裂带构造层次的分带性与成矿带上矿床中矿石类型的变化性之间的关系也有待于深入研究。上述研究现状和争议在一定程度上限制了人们对该区金成矿作用的认识，制约了找矿工作的开展。

成矿带内金矿化以含金石英脉为主，但脉体规模有所不同：矿带南段夹皮沟至八家子金矿床一带主要发育较大规模石英脉型金矿化[13]，中部小北沟金矿床含金石英脉以小而多但连续性较差，其上、下盘旁侧及尖灭处以发育少量低品位蚀变岩型（蚀变糜棱岩、片糜岩）矿体为显著特征[20]，北西段三道沟至板庙子金矿床含金石英脉又以较大规模为主[1]。因此，有必要在详细野外工作的基础上，对小北沟金矿床主成矿阶段矿石中石英开展系统的流体包裹体显微测温及 H－O－C 同位素测试，以制约成矿流体来源、成矿温压条件，揭示矿床成因类型与成矿深度。本次研究可为小北沟金矿床的深部找矿工作提供理论支撑，对成矿带上其他金矿床找矿工作也提供一定的参考。

1　区域地质背景

夹皮沟金成矿带位于龙岗（复合）地块北部，在白山微地块与夹皮沟微地块交界处夹皮沟微地块一侧（图 1a），经历了前新元古代龙岗地块克拉通化、新元古代—古生代古亚洲洋演化阶段、中—新生代滨西太平洋活动陆缘演化阶段，在多期复杂的构造动力学转换过程中逐渐形成了以 Au 为主，Fe、Ag、Cu 等次之的多金属成矿带[11]。

区域上地层主要有新太古界夹皮沟岩群，呈残留体状、断块状分布于夹皮沟微地块中，三道沟岩组主要分布于老金厂镇杨树沟—板庙子林场一带，为形成于岛弧构造环境下的拉斑玄武岩及中性火山-火山碎屑岩组成的火山-沉积建造（黑云片岩锆石 U－Pb年龄为 2 640 Ma）[21]；老牛沟岩组主要分布于夹皮沟镇四道岔—三道沟一带，为形成于海底火山作用下的火山碎屑岩含铁建造（二云片岩锆石 U－Pb年龄为 2 639 Ma）[21]，变质程度为高角闪岩-麻粒岩相，叠加了较多的绿片岩相。侵入岩主要为在龙岗地块和夹皮沟微地块内广泛分布的新太古代深成侵入岩——花岗闪长岩（Sm－Nd 全岩等时线年龄为（2 639±61）Ma）和英云闪长岩（锆石 U－Pb 年龄为（2 521±14）Ma），以及位于大砬子—夹皮沟断裂带下盘分布的哑铃状新太古代钾质花岗岩（锆石 U－Pb 年龄为（2 505±14）Ma）[2]，另外，龙岗地块北部陆缘活动带上主要分布晚古生代、中生代花岗质杂岩。脉岩主要有形成于晚三叠世—中侏罗世的正长斑岩、闪长玢岩、煌斑岩、辉绿岩等。区域大型断裂主要是 NW 向展布的大砬子—夹皮沟断裂带、青茶馆—白水滩断裂带（图 1a），它们先后经历了韧性、韧脆性和脆性变形过程，并在此过程中形成了一系列的 NE 向、NW 向、近 EW 向和近 SN 向的次级断裂，控制着夹皮沟金成矿带矿床、矿体的空间分布[2,7-9]。

2　小北沟金矿床地质特征

小北沟金矿床位于夹皮沟金成矿带中部，南东与头道岔和大线沟矿床毗邻，北西与老金厂矿床相接（图 1a）。除少量的第四系外，矿区内出露的主要地层为太古宇夹皮沟岩群三道沟岩组（图 1b、c），岩性主要包括斜长角闪（片麻）岩，以角闪岩相变质作用为主，局部达麻粒岩相，岩石发育石榴石、紫苏辉石等矿物（图 2a、b、c），呈残留体状、断块状分布于新太古代花岗闪长岩（图 2d）、英云闪长岩中。新太古代钾质花岗岩分布于矿区的西南角。中生代侵入岩均以岩脉形式产出，岩性包括闪长（玢）岩（图 2e）、煌斑岩、辉绿岩、正长斑岩等。辉绿岩、闪长玢岩与金矿体的空间关系最为密切，它们常与矿体在晚期叠加的脆性断裂内共伴生产出，且产状基本一致（图 1b）。矿区内断裂构造较发育，为成矿前脉岩和矿体的充填创造了条件，主要有 NW 向成矿前主剪切带，北西带上盘毗邻平行产出的成矿期矿化蚀变构造带，NW、NE 以及 SN 向成矿后断裂构造等[12]。分布于矿床西南的 NW 向主剪切带（大砬子—夹皮沟断裂带区内出露部分）构造活动与成矿关系密切（图 1），总体走向 320°～330°，倾向 NE，倾角 70°～80°，宽 90～130 m，岩性主要为碎裂岩、糜棱岩、千糜岩及各类中酸性脉岩，发育多条平行断层、破碎带及挤压片理化带，局部地段有金矿体产出。主蚀变带毗邻主剪切带上盘平行产出（图 1b、c），幅宽 200～300 m，沿走向或倾斜方向具舒缓波状特征，带内岩石主要为花岗闪长岩和斜长角闪岩

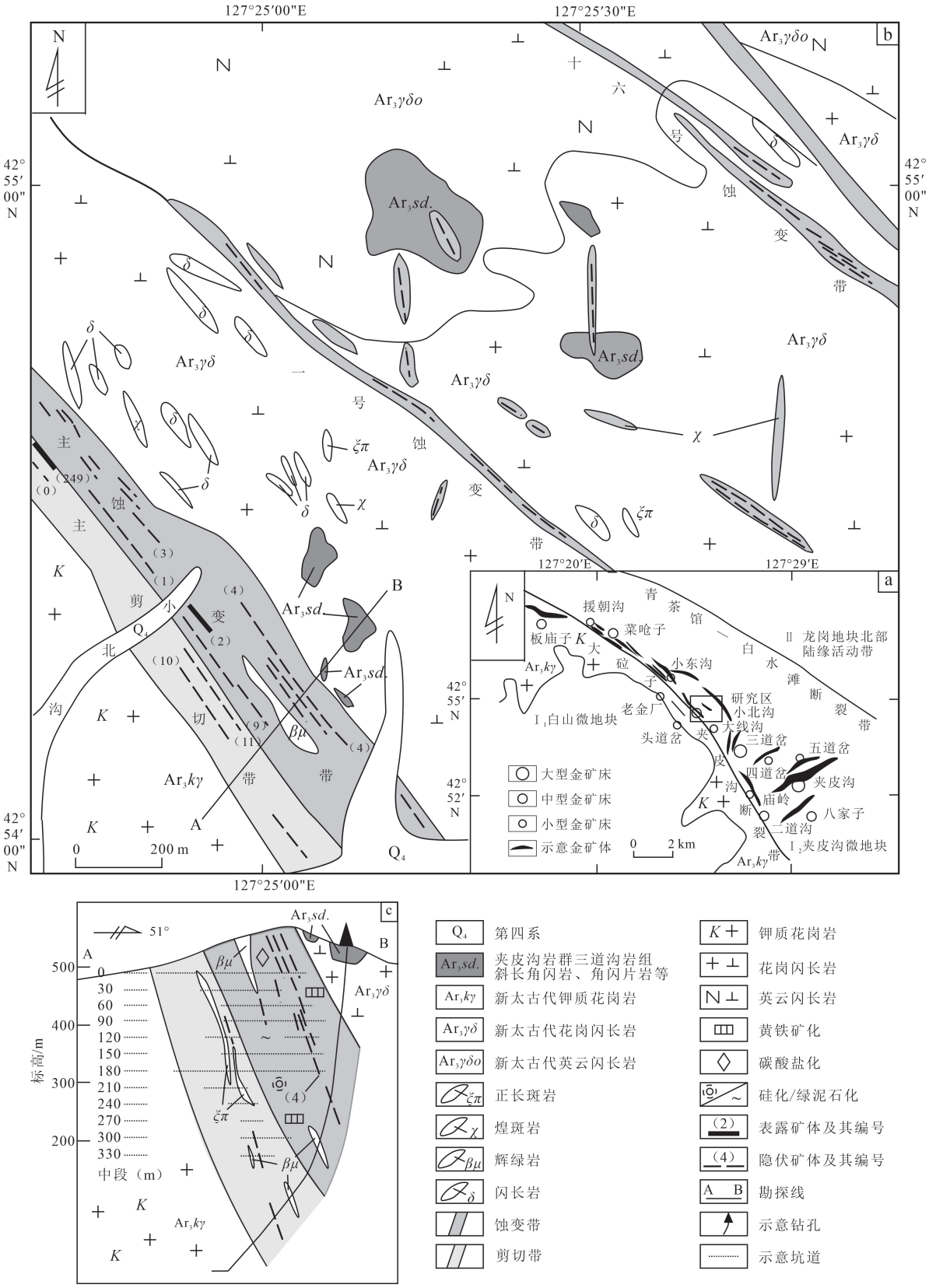
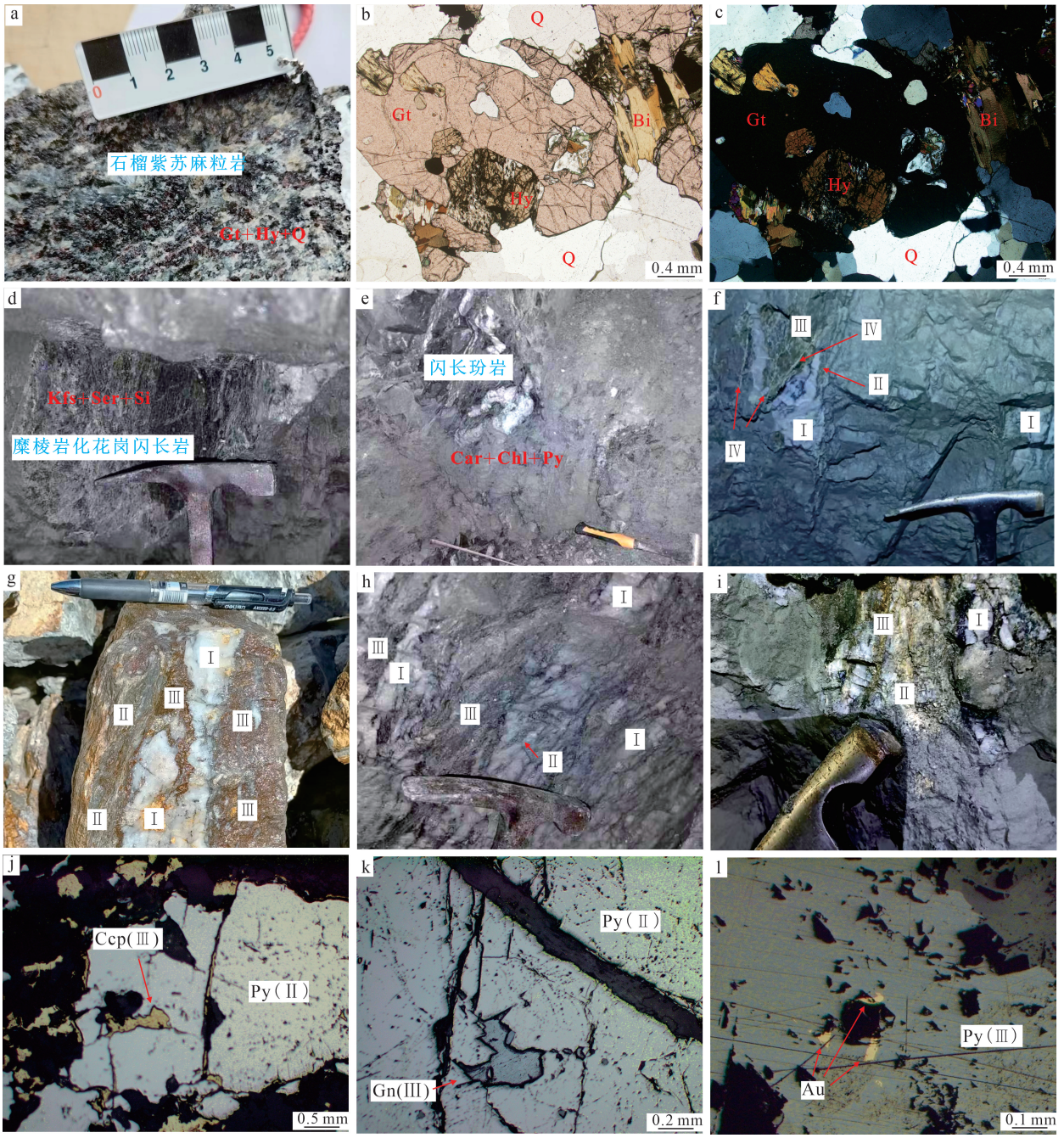


图1 小北沟金矿床区域地质图(a)、矿区地质图(b)及典型勘探线剖面图(c)

Fig.1 Regional geological map (a), geological sketch map (b) and typical exploration line cross-sectional map (c) of Xiaobeigou gold deposit

等遭受动力变质作用形成的碎裂岩、糜棱岩化岩石、糜棱岩和千糜岩,是小北沟金矿床主要矿体的赋存空间。主蚀变带倾向北东方向,在小北沟东山还发育有一号蚀变带、十六号蚀变带等两条规模较大的平行蚀变带以及一些次级派生的近南北向蚀变带(图 1b)。



a、b、c. 石榴紫苏麻粒岩;d. 糜棱岩化花岗闪长岩发育钾化、硅化、绢云母化;e. 碳酸盐化、绿泥石化、黄铁矿化的闪长玢岩脉;f、g、h、i. 不同成矿阶段矿物特征及相互间穿切关系;j. 黄铜矿交代黄铁矿(交代结构);k. 方铅矿交代黄铁矿(交代结构);l. 黄铁矿中自然金(包裹金)。Ⅰ. 含黄铁矿-石英阶段;Ⅱ. 石英-黄铁矿阶段;Ⅲ. 金-多金属硫化物阶段;Ⅳ. 碳酸盐-黄铁矿阶段。Car. 碳酸盐化;Chl. 绿泥石化;Kfs. 钾化;Gt. 石榴石;Hy. 紫苏辉石;Q. 石英;Ser. 绢云母化;Si. 硅化;Au. 自然金;Ccp. 黄铜矿;Gn. 方铅矿;Py. 黄铁矿;Bi. 黑云母。

图 2　小北沟金矿床地层、花岗岩、岩脉、矿体、矿石蚀变与矿物特征照片

Fig.2　Photos of the stratigraphy, granite, veins, ore bodies, ore alteration, and mineral characteristics of Xiaobeigou gold deposit

矿体小而多,形态、类型及矿体关系复杂,受北西向主剪切带及其上盘的主蚀变带控制。按产出部位以脉组形式进行编号,可分为9个脉组,矿区北西部发育0、249、1、4号脉组,中部有1、2、3、4号脉组,南东端有10、11、1、9、4号脉组(图1b);各脉组产状近于平行一致,走向320°～330°,倾向NE,倾角70°～90°,空间展布呈舒缓波状,单一脉组或规模较大的矿体有向北西深部侧伏特征。单条矿体走向一般为321°,倾向NE,倾角64°～75°,延长最长约为100 m,一般为50 m,斜深一般大于延伸,多呈透镜体状,具膨胀收缩、分支复合、尖灭再现特点,平均水平厚度为0.82 m,最厚3.25 m,最薄0.13 m[14]。

矿石类型以含金硫化物(主要为黄铁矿)石英脉为主(图2f、g、h、i),在主矿体上、下盘旁侧及尖灭处还发育少量低品位糜棱岩(片糜岩)型矿体。矿石中金属矿物体积分数约占5.88%,非金属矿物体积分数约占94.12%。金属矿物中金属硫化物主要有黄铁矿(图2j、k、l),次要金属矿物为黄铜矿(图2j)等,还有少量的闪锌矿、方铅矿(图2k)等,贵金属矿物有自然金(图2l)和银金矿。非金属矿物主要以石英、长石为主,次要矿物有绢云母、绿泥石、方解石等。矿石结构为半自形—他形粒状结构、压碎结构、滴状结构,矿石构造有团块状构造、条带状构造、细脉状构造(图2f、g、h)、浸染状构造和角砾状构造等。

通过矿石矿物共生组合、相互间穿插交代关系、标型特征及矿石结构构造的研究,矿床热液成矿期可划分为4个成矿阶段[20]:含黄铁矿-石英阶段(Ⅰ)(图2f、g、h),为成矿作用的早期,形成石英脉主体,石英脉呈乳白色块状,并有极少量黄铁矿、磁黄铁矿出现,呈不规则粒状分布,矿物组合黄铁矿+磁黄铁矿+石英+钾长石+绢云母;石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)(图2f、g、h、i),为弱含金阶段,黄铁矿呈中细粒半自形、自形晶,团块状或星点状分布在石英脉中或蚀变岩中,交代早期形成的黄铁矿或磁黄铁矿,金(银)矿物主要为银金矿,包于磁黄铁矿中或分布于黄铁矿的晶隙及裂隙中,矿物组合黄铁矿+磁黄铁矿+石英+银金矿+自然金;金-多金属硫化物阶段(Ⅲ)(图2g、h、j、k、l),为主成矿期,多金属硫化物多呈细粒半自形,细脉状(位于石英脉两端)、条带状(位于石英脉两端或两侧)和团块状(位于石英脉中部)集合体分布在石英脉中,矿物间相互充填交代作用较强烈,金矿物主要为银金矿和自然金,分布于黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿及石英的裂隙中,矿物组合黄铁矿+磁黄铁矿+黄铜矿+方铅矿+闪锌矿+石英+银金矿;碳酸盐-黄铁矿阶段(Ⅳ)(图2f),是成矿作用的尾生阶段,本阶段不含金,黄铁矿呈亮黄色,自形,细粒集合体,石英和方解石等碳酸盐矿物多呈脉体穿插于矿石之中。

含金石英脉赋矿围岩多为糜棱岩化花岗闪长岩、闪长玢岩,蚀变作用强烈(图2g、h)。蚀变矿物具有明显的水平分带特征,由矿体中心向两侧依次为强硅化、绢云母化、绿泥石化+绿帘石化、弱钾化(钾长石化+黑云母化)。与矿化关系最为密切的蚀变作用是硅化、绢云母化和黄铁矿化。矿体两侧的花岗质岩石均发生强烈的硅化作用,同时伴随一定强度的绢云母化作用,黄铁矿多表现为浸染状分布在围岩中。绿泥石化蚀变作用表现为绿泥石呈集合体的形式构成细脉或网脉,绿泥石化蚀变作用分布广泛,在靠近矿体处叠加在硅化蚀变之上,而在远离矿体处多见于叠加在钾化蚀变之上或与碳酸盐化蚀变作用共同出现[14]。

3 样品采集及研究方法

在对矿床地质特征进行详细野外地质调查和岩相学观察的基础上,本次研究选取8件主成矿阶段Ⅲ的含金石英脉矿石样品进行流体包裹体研究,其中细脉状硫化物矿石(图2i)2件、条带状硫化物矿石(图2h)3件、团块状硫化物矿石(图2f、j)3件;4件石英样品进行了流体包裹体C、H、O同位素分析,其中细脉状硫化物矿石1件(样号22GP-2)、条带状硫化物矿石2件(样号22GP-5,6)、团块状硫化物矿石1件(样号22GP-9)。这些样品采自井下180中段的4号矿体。

流体包裹体测试分析工作均在吉林大学地球科学学院流体包裹体实验室完成,室内将矿石磨制成厚约0.02 mm的双面剖光光薄片,无水乙醇浸泡清洗后晾干用以进行流体包裹体岩相学及显微测温研究。测温仪器为英国Linkan THMSG-600型冷热两用台,分析精度低于0 ℃时为±0.1 ℃,高于200 ℃时为±2 ℃。流体包裹体C、H、O同位素分析在核工业北京地质研究院稳定同位素实验室完成,具体实验流程、仪器参数和标样情况参见文献[11]。

4　实验结果

4.1　流体包裹体

4.1.1　流体包裹体岩相学特征

镜下可见，主成矿阶段石英中捕获了大量的流体包裹体，根据流体包裹体在室温条件(25 ℃)下的相态和冷冻、升温过程中的相态变化可分为 CO_2、富 CO_2、含 CO_2 及气液两相 4 种类型流体包裹体(图 3)，在石英颗粒中多随机分布，不同类型包裹体成群产出，显示原生流体包裹体属性。8 件样品中包裹体类型与岩相学特征基本相同，呈现出同一成矿阶段特点[22]。

CO_2 包裹体：多呈椭圆形及次圆状，室温下呈单一相态形式产出，大小一般在 5～10 μm 之间，多数小于 8 μm。少量呈气相 CO_2 和液相 CO_2 两相形式产出，后者气相 CO_2 占比一般为 10%～25%。

富 CO_2 包裹体：呈椭圆形及长条状，室温下由 CO_2 及水溶液两相组成，CO_2 所占比例一般为 85%～95%，包裹体大小一般为 5 为～12 μm，多数大小介于 6～8 μm 之间。

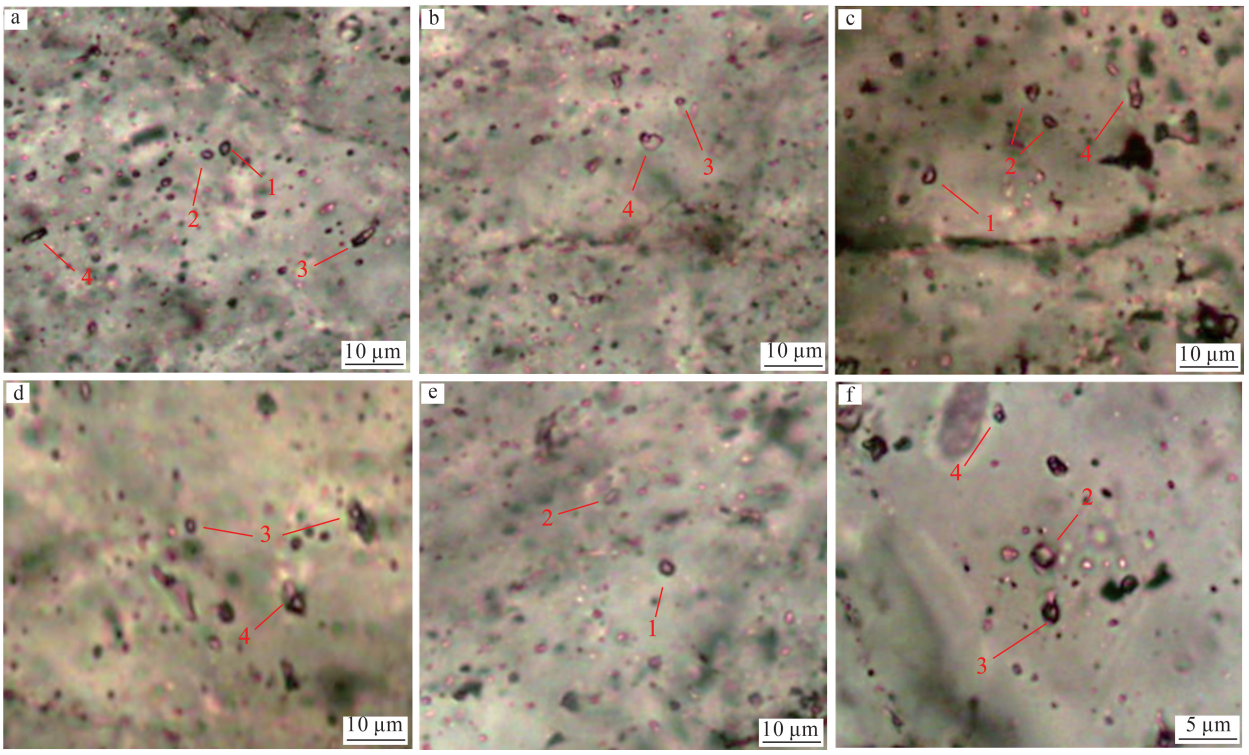
含 CO_2 包裹体：多呈椭圆形及长条状，室温下由 CO_2 及水溶液两相组成，CO_2 相所占比例一般为 35%～40%，少数可达 40%～45%，该类包裹体大小一般为 6～10 μm，个别可达 15 μm。

气液两相包裹体：形态多为椭圆形、长条形及不规则状，室温下由气泡及水溶液相两相组成，气液比一般为 15%～20%，部分可达 20%～25%，该类包裹体大小一般为 6～12 μm，多数小于 10 μm。

4.1.2　流体包裹体显微测温结果

小北沟金矿床流体包裹体的显微测温结果如表 1 和图 4 所示。

CO_2 包裹体：室温下呈单一相态，降温过程中凝聚出气泡而成为两相包裹体。升温过程中测得固相 CO_2 熔化温度各类型矿体基本相同，为 −60.4～−59.0 ℃；包裹体均一温度细脉状硫化物矿石为 −24.7～−11.5 ℃，条带状硫化物矿石为 −6.2～3.4 ℃，团块状硫化物矿石为 11.9～26.6 ℃；估算其密度依次为0.87～0.91、0.81～0.85、0.67～0.77 g/cm^3，表现为 CO_2 密度较大且逐渐降低的特点。



a、b. 细脉状硫化物矿石；c、d. 条带状硫化物矿石；e、f. 团块状硫化物矿石。1. CO_2 包裹体；2. 富 CO_2 包裹体；3. 含 CO_2 包裹体；4. 气液两相包裹体。

图 3　小北沟金矿床主成矿阶段流体包裹体岩相学特征

Fig.3　Petrographic characteristics of representative fluid inclusions from Xiaobeigou gold deposit

表1 小北沟金矿床主成矿阶段流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data for three type of fluid inclusions in quartz grains of main stagesin Xiaobeigou gold deposit

矿石类型	包裹体类型	$T_{m.CO_2}$/℃	$T_{m.cla}$/℃	$T_{h.CO_2}$/℃	$T_{m.ice}$/℃	$T_{m.TOT}$/℃	w(NaCl)/%	ρ_{CO_2}/(g/cm^3)	ρ/(g/cm^3)
细脉状硫化物矿石	CO_2包裹体	−60.3～−59.3		−24.7～−11.5				0.87～0.91	
	富CO_2包裹体	−60.2～−59.7	7.6～8.1	−24.5～−21.9		329.8～354.7	3.76～4.69		0.65～0.69
	含CO_2包裹体	−59.8～−59.5	6.6～7.8	−16.7～−11.5		298.6～348.5	4.32～6.46		0.67～0.79
	气液两相包裹体				−7.6～−5.8	275.6～325.4	8.94～11.23		0.77～0.83
条带状硫化物矿石	CO_2包裹体	−60.2～−59.0		−6.2～3.4				0.81～0.85	
	富CO_2包裹体	−60.2～−59.0	6.7～8.2	−6.0～6.5		267.5～361.2	3.57～6.29		0.65～0.80
	含CO_2包裹体	−60.1～−58.7	6.7～7.5	−4.6～5.9		287.2～331.2	5.23～6.29		0.72～0.78
	气液两相包裹体				−8.1～−4.9	243.5～347.3	7.72～11.84		0.75～0.91
团块状硫化物矿石	CO_2包裹体	−60.4～−59.3		11.9～26.6				0.67～0.77	
	富CO_2包裹体	−60.1～−59.4	6.6～8.1	10.2～20.2		263.8～336.9	3.76～6.46		0.69～0.81
	含CO_2包裹体	−68.9～−60.1	6.6～7.5	10.8～28.5		245.6～362.5	4.14～6.46		0.65～0.84
	气液两相包裹体				−8.2～−4.4	226.8～329.3	7.01～11.95		0.77～0.90

注:$T_{m.CO_2}$.固态CO_2熔化温度;$T_{m.cla}$.笼合物熔化温度;$T_{h.CO_2}$.CO_2相均一温度;$T_{m.ice}$.冰点温度;$T_{m.TOT}$.完全均一温度;ρ_{CO_2}.CO_2相密度;ρ.包裹体密度。

富CO_2包裹体:室温下呈CO_2及水溶液两相状态,降温过程中CO_2相中凝聚出CO_2气泡而成为三相包裹体。升温过程中,测得该类包裹体CO_2固相熔化温度为−60.2～−59.0 ℃,包裹体CO_2相部分均一温度有所不同:细脉状硫化物矿石为−24.5～−21.9 ℃,条带状硫化物矿石为−6.0～6.5 ℃,团块状硫化物矿石为10.2～20.2 ℃;表明CO_2相密度逐渐降低的特点。包裹体笼形物熔化温度为6.6～8.2 ℃,对应流体盐度(w(NaCl))为3.57%～6.46%,w(NaCl)峰值为4.69%～6.46%(图4b、d、f),包裹体以完全均一至CO_2相方式为主,完全均一温度变化范围:细脉状硫化物矿石为329.8～354.7 ℃,条带状硫化物矿石为267.5～361.2 ℃,团块状硫化物矿石为263.8～336.9 ℃(图4a、c、e)。依据包裹体完全均一温度及盐度,估算流体密度依次为0.65～0.69、0.65～0.80、0.69～0.81 g/cm^3。

含CO_2包裹体:室温下呈CO_2及水溶液两相状态,降温过程中CO_2相中凝聚出CO_2气泡而成为三相包裹体。升温过程中,测得该类包裹体CO_2固相熔化温度为−68.9～−58.7 ℃,包裹体均一温度细脉状硫化物矿石为−16.7～−11.5 ℃,条带状硫化物矿石为−4.6～5.9 ℃,团块状硫化物矿石为10.8～28.5 ℃;表明CO_2相密度逐渐降低的特点。包裹体笼形物熔化温度为6.6～7.8 ℃,对应流体

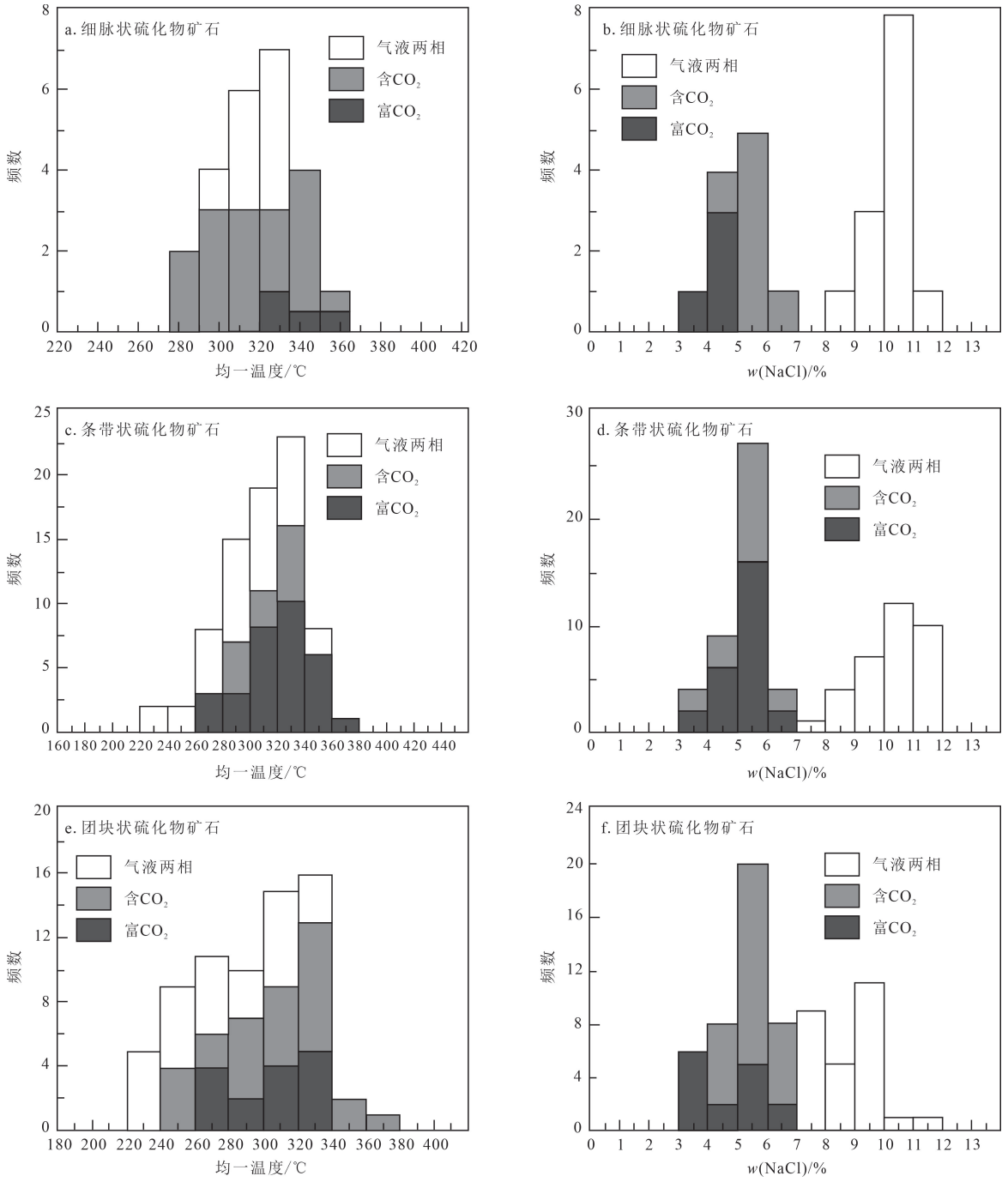


图 4　小北沟金矿床主成矿阶段完全均一温度直方图与盐度直方图

Fig.4　Histograms of the total homogenization temperature and salinity for fluid inclusions in quartz of main stages from Xiaobeigou gold deposit

w(NaCl)为 4.14%～6.46%，w(NaCl)峰值为 6.29%～6.46%(图 4b、d、f)，包裹体完全均一以均一至水溶液相方式为主，完全均一温度变化范围依次为 298.6～348.5 ℃、287.2～331.2 ℃、245.6～362.5 ℃(图 4a、c、e)。依据包裹体完全均一温度及盐度，估算流体密度依次为 0.67～0.79、0.72～0.78、0.65～0.84 g/cm^3。

气液两相包裹体：室温下由气泡及水溶液相两相组成。冷冻—升温过程中测得该类包裹体冰点温度为－8.2～－4.4 ℃，对应流体 w(NaCl)为 7.01%～11.95%(图 4b、d、f)；包裹体以均一至液相方式为主，完全均一温度变化范围细脉状硫化物矿

石为275.6～325.4 ℃,条带状硫化物矿石为243.5～347.3 ℃,团块状硫化物矿石为226.8～329.3 ℃(图4a、c、e)。依据包裹体完全均一温度及盐度,估算流体密度依次为0.77～0.83、0.75～0.91、0.77～0.90 g/cm^3。

4.2 H－O－C同位素

对小北沟金矿床主成矿阶段4件石英样品进行了流体包裹体H－O－C同位素分析,结果(表2)表明:细脉状硫化物矿石氧同位素$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为11.1‰,换算成流体包裹体水氧同位素$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$值为4.3‰,包裹体水氢同位素$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为－98.9‰;条带状硫化物矿石氧同位素$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为10.8‰和11.3‰,换算成流体包裹体水氧同位素$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$值为4.0‰和3.7‰,包裹体水氢同位素$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为－102.8‰、－96.7‰;团块状硫化物矿石氧同位素$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为11.1‰,结合均一温度换算成流体包裹体水氧同位素$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$值为3.5‰,包裹体水氢同位素$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为－99.4‰。结合前人研究成果(表2),小北沟金矿床各成矿阶段的$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值分别为早期－92‰和－97‰、主期－102.8‰～－92‰、晚期－97‰～－78‰,$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值分别为早期4.0‰和11.6‰、主期8.3‰～11.3‰、晚期4.4‰～12.8‰,$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$值分别为早期0.50‰和5.49‰、主期－3.26‰～4.3‰、晚期－9.40‰～－2.68‰。

包裹体CO_2碳同位素分析(表2)表明,4件样品包裹体碳同位素$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$值为－20.6‰～－8.3‰。其中细脉状硫化物矿石(22GP－2)为－14.8‰,条带状硫化物矿石(22GP－5,6)为－17.9‰和－8.3‰,块状硫化物矿石(22GP－9)为－20.6‰,总体上呈现出随金属硫化物增多碳同位素值逐渐降低的特点。

5 讨论

5.1 成矿流体性质与演化

研究[12]表明,夹皮沟地区金矿床的成矿流体总体上具有中温(170～310 ℃)、中低盐度(1%～18%)的特点,并可分为CO_2－H_2O－NaCl体系和NaCl－H_2O体系。小北沟金矿床主成矿阶段矿石发育CO_2、富CO_2、含CO_2及气液两相4种类型原生流体包裹体,它们在石英颗粒中共生发育的事实表明成矿流体均属CO_2－H_2O－NaCl体系热液;在同一视域内可见4种类型原生流体包裹体共存(图3),表明其捕获时成矿流体处于一种不均匀热液体系状态,同时暗示成矿流体可能发生过不混溶作用[22-24];成矿温度范围为227～363 ℃之间,属于中低温成矿;w(NaCl)变化范围在3%～12%之间,属中低盐度范围;密度为0.65～0.91 g/cm^3。上述表明本矿床主成矿阶段成矿流体为一种中低温、中低

表2 小北沟金矿床不同成矿阶段石英的H－O－C同位素分析结果

Table 2 H－O－C isotope analysis of quartz at different ore-forming stages in Xiaobeigou gold deposit

成矿阶段	样品编号	检测结果					数据来源
		$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$/‰	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$/‰	均一温度/℃	$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$/‰	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$/‰	
早阶段		4.0	－92	425	0.50		[15]
		11.6	－97	320	5.49		[15]
主阶段	22GP－2	11.1	－98.9	318	4.3	－14.8	本文
	22GP－5	10.8	－102.8	318	4.0	－8.3	本文
	22GP－6	11.3	－96.7	295	3.7	－17.9	本文
	22GP－9	11.1	－99.4	295	3.5	－20.6	本文
		8.3	－102	240	－1.14		[14]
		9.1	－92	190	－3.26		[15]
晚阶段		4.8	－78	165	－9.40		[14]
		4.4	－78	165	－9.20		[14]
		9.1	－92	167	－4.95		[14]
		12.8	－97	150	－2.68		[15]

盐度和低密度的富 CO_2 的 $CO_2-H_2O-NaCl$ 体系。

不同类型矿石中石英气液两相、含(富)CO_2 包裹体均一温度与盐度条件相近(表 1、图 5)，但 CO_2 包裹体和富 CO_2 包裹体 CO_2 相均一温度、CO_2 相密度差异明显(表 1)，随硫化物增多均一温度逐渐升高，CO_2 相密度逐渐降低。反映在同一成矿阶段，成矿物理化学环境基本相同的背景下，成矿压力的波动(降低)造成包裹体捕获压力降低。容矿断裂形成的张性空间越大、带内压力越低、流体不混溶程度越高，导致捕获的 CO_2 相密度越小，均一温度越高。反映在硫化物发育数量上，构造张性空间越大、压力越低、流体不混溶程度越高，硫化物沉淀数量越多，在石英脉中分布形态由细脉状至条带状，再至团块状。

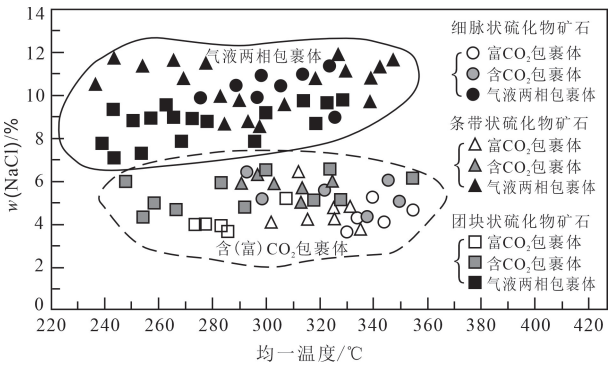


图 5　小北沟金矿床主成矿阶段流体包裹体的均一温度与盐度关系

Fig.5　Plots of homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions of main stages from Xiaobeigou gold deposit

5.2　成矿流体来源及矿床成因

前人[14-15]对小北沟金矿床的 H－O 同位素的研究表明，成矿流体具有幔源流体特征，极有可能是来自于岩浆水。本次 H－O 同位素测试结果(表 2)表明，小北沟金矿床主成矿阶段的 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为 −98.9‰、−102.8‰、−96.7‰、−99.4‰，$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值为 4.3‰、4.0‰、3.7‰、3.5‰，该范围与岩浆水的 H－O 同位素组成($\delta D_{V\text{-}SMOW}=-80‰\sim-50‰$，$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}=6‰\sim10‰$)基本一致，明显区别于典型变质水的 H－O 同位素组成($\delta D_{V\text{-}SMOW}=-65‰\sim-20‰$，$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}=5‰\sim25‰$)[11,14]。

在反映流体来源的 $\delta D_{V\text{-}SMOW}-\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ 组成图解(图 6)中，主成矿阶段样品投点均位于地幔初生水左脚下方中国金铜系列岩浆水[25]左侧，反映了流体来源相对统一，直接来源于地幔流体或深部岩浆分异热液。同时还可以看出，成矿早阶段样品数据更倾向岩浆水范围，成矿晚期阶段的数据点均向大气降水线方向移动，即发生了明显的“氧漂移”，显示岩浆水与大气降水混合特征，暗示随着成矿作用的演化，成矿流体中有大气降水的加入。

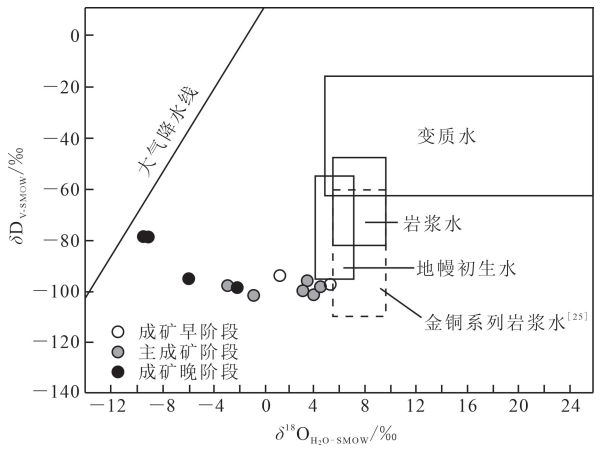


图 6　小北沟金矿床流体包裹体 H－O 同位素组成图解

Fig.6　H－O isotopic compositions plots of representative fluid inclusions from Xiaobeigou gold deposit

由于所研究矿石包裹体挥发性成分中主要为 CO_2，因此包裹体 CO_2 碳同位素组成基本代表了流体总碳同位素组成。与地球中各类碳储库碳同位素对比分析(表 2、图 7)表明，小北沟金矿床成矿流体碳同位素值低于地幔、岩浆来源碳同位素值，趋向于有机碳同位素值。造成此类碳同位素组成原因可能包括：1)初始流体来自岩浆，并受到大气降水带来的上覆地层中有机质碳加入；2)深源岩浆侵位过程中受到围岩中有机物质的混染；3)来自地幔中含有机物质导致的低碳同位素区的幔源流体。由于小北沟金矿床赋矿围岩地层中缺乏有机质，因此，由 1)、2)引起的可能性较低。由表 2 可知，小北沟金矿床主成矿阶段的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 值分别为 −8.3‰、−14.8‰、−17.9‰和−20.6‰，与双辽地区地幔捕虏体交代流体 $\delta^{13}C$ 值(−24.3‰ ～−18.5‰)基本一致，也与中国东部其他地区地幔捕虏体释出 CO_2 的碳同位素特征相近(图 7)。而研究[26-28]表明，俯冲太平洋板片之上由于沉积有机质的混入，是造成双辽地区地幔捕虏体交代流体现有特征的主要原因。类比认

为小北沟金矿床流体包裹体 CO_2 碳同位素有机成因特征也应由太平洋板块俯冲引起。

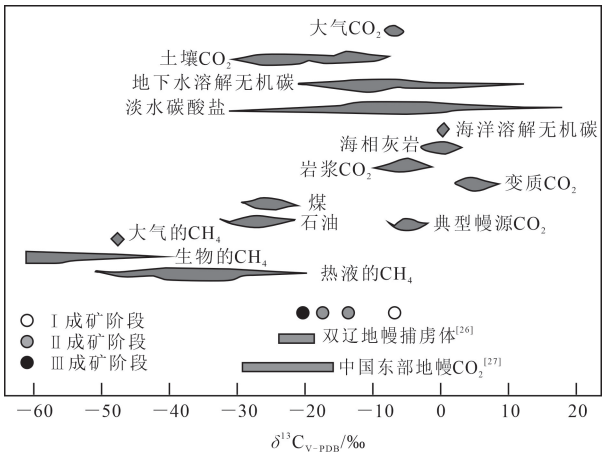


图 7 小北沟金矿床主成矿阶段 C 同位素组成图解

Fig.7 C isotopic compositions plots of representative fluid inclusions from Xiaobeigou gold deposit

5.3 成矿压力与成矿深度

研究表明,成矿深度与成矿压力具非线性关系。既不能简单地用静岩压力梯度计算,也不能用静水压力梯度计算,不同压力段计算成矿深度的公式有所不同[29-30]。

1)当测得的流体压力小于 40 MPa 时,用静水压力梯度来计算。即用压力除以静水梯度(10 MPa/km),即

$$y=x/10。 \quad (1)$$

2)当测得的流体压力为 40～220 MPa 时,

$$y=0.0868/(1/x+0.00388)+2。 \quad (2)$$

3)当测得的流体压力为 220～370 MPa 时,

$$y=11+e^{(x-221.95)/79.075}。 \quad (3)$$

4)当测得的流体压力大于 370 MPa 时,

$$y=0.0331385x+4.19898。 \quad (4)$$

式中:x、y 分别代表流体压力值(MPa)和成矿深度(km)。

由表 1 可知,利用不混溶包裹体等容线相交法(图 8)[11,31]获得本矿床矿石形成压力估算范围为 70～206 MPa,平均约为 138 MPa,利用式(2)计算得出成矿深度为 7.8～11.8 km,平均为 9.8 km。

小北沟矿区三道沟岩组斜长角闪岩矿物成分主要为角闪石、斜长石,另外发育石榴石、紫苏辉石(图 2b、c),说明变质程度为高角闪岩相-麻粒岩相,矿区剥蚀程度较深;控矿构造为叠加在早期韧性剪切带之上的次级脆性断裂构造,含金石英脉长度、宽度规模不大,矿体相互平行且小而多,多出现在糜棱岩或超糜棱岩中,在石英脉两端或旁侧还常见有糜棱岩型、片糜岩型等蚀变岩型矿体,可见本矿床成矿环境为由脆性向韧脆性过渡的较深层次的挤压构造环境。由表 3 可知,小北沟金矿床主成矿阶段 CO_2 包裹体 CO_2 相均一温度明显低于邻近其他矿床,也暗示本矿床成矿深度较深。

成矿过程(含金石英脉形成过程)实际上是物理化学状态相对平衡的含矿气水热液由高压区(总体构造环境)迁移到低压区(断裂构造局部应力释放区,本矿床为脆性剪切裂隙),减压沸腾导致平衡破坏,含矿气水热液积淀凝固形成矿体,这个减压的过程被对压力变化相对敏感的 CO_2 包裹体以 CO_2 相均一温度升高、CO_2 相密度降低的形式记录下来(表 1、图 8)。可见,本矿床主成矿阶段流体包裹体特征一定程度上反映了较深层次构造环境下含矿气水热液聚集沉淀成矿的温压环境变化过程。

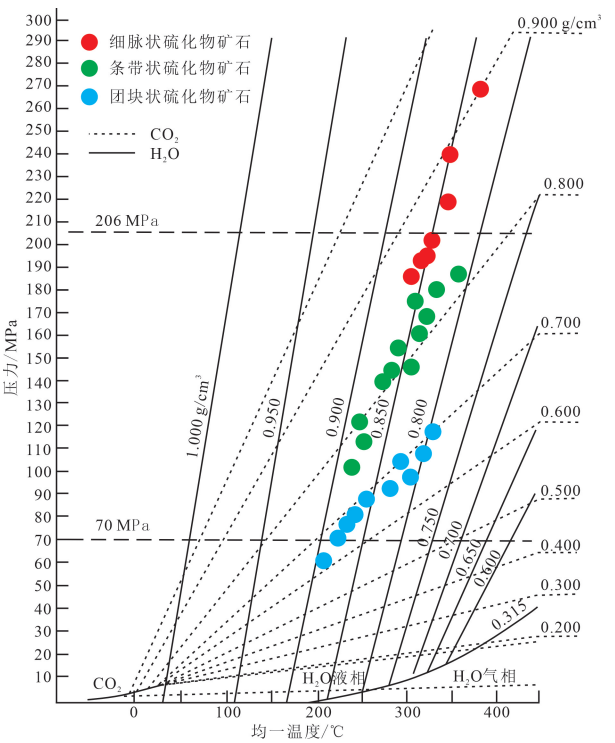


图 8 小北沟金矿床主成矿阶段流体压力估算图解

Fig.8 Estimated trapping pressure diagram of ore-forming fluids for the main mineralization stage in Xiaobeigou gold deposit

表 3　夹皮沟金成矿带主要矿床成矿压力与深度

Table 3　Metallogenic pressure and depth of main deposits in Jiapigou gold metallogenic belt

矿区	完全均一温度/℃	CO_2相均一温度/℃	成矿压力/MPa	成矿压力均值/MPa	成矿深度/km	成矿深度均值/km	资料来源
板庙子	129～326		34.7～109.6	72.3	6～7	6.5	[30]
小北沟	275.6～357.4	−24.7～26.6	70～206	138	7.8～11.8	9.8	本文
三道岔	104～375	21.9～29.7	40.49～112.72	76.61	1.10～3.54	2.32	[11]
四道岔	117.5～374.6		43.5～109.6	76.55	1.20～3.58	2.39	[32]
立山坑	218.2～428.0	28.5～31.0	75～125	100	4.4～7.5	5.9	[33]
夹皮沟本坑	200～360		115.0～187.7	151.4	9.11～10.57	9.84	[19]
二道沟	190～290	23.8～30.9	135～145	152.5	5.1～8.0	6.55	[14]
八家子	94.7～323.0	23.3～31.2	26.1～97.4	55.6	1.08～3.42	2.06	[34]
大架子	100～265	13.5～29.2	9.98～78.66	44.32	3.06～7.92	5.49	[35]

注:成矿压力计算时只采用不混溶体系中端元包裹体(即表 1 中 CO_2包裹体和少量富 CO_2包裹体、气液两相包裹体)相关数据,并剔除过高或过低数据。

5.4　夹皮沟金成矿带矿化垂向分带及进一步找矿意义

不论是对夹皮沟金成矿带上各矿床(点)的矿床成因类型和成矿时代持何种不同的学术观点,其与北西向大砬子—夹皮沟断裂带有着密切的关系从未受到怀疑[2]。受大型韧脆性断裂构造控制的热液脉状矿床可以在地壳连续成矿,成矿深度从近地表到地壳至少 15 km,可分成 4 个构造层次类型,即近地表(约<6 km)、脆性区(6～10 km)、韧脆性区(10～12 km)、超韧性—韧性区(>12 km)[36-39]。这种成矿深度由浅到深的变化体现在矿体围岩从次绿片岩相到麻粒岩相,矿石类型从石英脉型(又可细分为相互交叉的网脉状、粗脉状、相互平行的细脉状)、构造蚀变岩型至蚀变糜棱岩型,成矿流体温度上由低到高,从不到 200 ℃到超过 590 ℃,成矿压力从 5.31 MPa到 160 MPa,成矿流体的盐度从不足 5% 的低盐度到 50%的高盐度,表明成矿流体来源从以大气降水为主演变到深源流体来源的变化过程[19,40-41]。

夹皮沟金成矿带上的其他主要金矿床,成矿深度多在 2～7 km 之间(表 3),处于脆性区构造层次,深部找矿空间很大(图 9)。目前开采深度已超过 1 500 m的二道沟金矿床,近 NS 向主蚀变带内浅部含有多条含金石英脉,由浅至深矿体间距逐渐缩小,数量逐渐减小,由浅部的 4 条主矿体向深部 510 m 中段收敛至 1 条新 1 号脉主矿体,矿体垂直延伸大、连续性好,沿倾向延伸大于 1 600 m,已开采至 1 410 m中段[42];成矿带西部的板庙子金矿床,地表(0 m 中段,标高 410 m)出露 30 条蚀变带,向深部逐渐尖灭合并收敛,至 180 m 中段(标高230 m)仅剩 302、303 两条蚀变带,垂向延伸较大,至 652 m 中段(−243 m 标高)仍很稳定[43],同样表现出地表(浅部)发育多条脉宽变化较大、以中细脉(脉宽0.2～

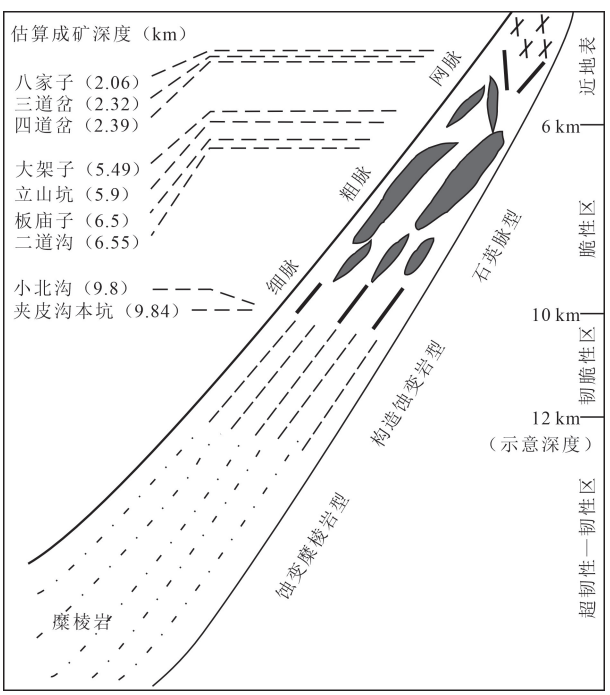


图 9　夹皮沟金成矿带主要金矿床成矿深度示意图

Fig.9　Schematic diagram of metallogenic depth of main gold deposits in Jiapigou metallogenic belt

1.5 m)为主的含金石英脉,向深部逐渐收敛至1～2条(1.2～2.0 m)相对稳定的中脉至大脉的变化规律。夹皮沟本坑成矿深度约为9.84 km,已处于脆性区构造层次末端,下戏台坑的新10号脉(含金石英脉)在350 m中段下盘已出现了新的蚀变岩型矿体,其与含金石英脉型矿体相伴生,主要为破碎带蚀变岩型金矿体[44]。小北沟金矿床成矿深度约为9.8 km,应处于脆性区构造层次向脆韧性区构造层次过渡部位,深部仍应有一定的找矿前景,但矿石类型可能转为构造蚀变岩型或蚀变糜棱岩型。目前已知含金石英脉两端或旁侧常见的糜棱岩型、片糜岩型等蚀变岩型矿体,深部可能会成为主要矿石类型。

6 结论

1)小北沟金矿床主成矿阶段矿石中石英发育CO_2、富CO_2、含CO_2及气液两相4种类型原生流体包裹体,成矿流体为中低温、中低盐度和低密度的富CO_2的$CO_2-H_2O-NaCl$体系。

2)包裹体中氧同位素$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为10.8‰～11.3‰,水氧同位素$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$值为3.7‰～4.3‰,氢同位素$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为－102.8‰～－96.7‰;碳同位素$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$值为－20.6‰～－8.3‰,主成矿阶段成矿流体具幔源特征。

3)包裹体测温结果显示:主成矿阶段成矿温度变化范围在226.8～362.5 ℃之间,盐度为3.75%～11.95%,密度为0.65～0.91 g/cm^3,成矿压力为70～206 MPa,成矿深度约为9.8 km。依据热液脉状矿床地壳连续成矿模式,本矿床应处于深大断裂带中脆性区构造层次向韧脆性区构造层次过渡部位,深部仍应有一定的找矿前景,但矿石类型可能转为构造蚀变岩型或蚀变糜棱岩型。

参考文献(References):

[1] 窦志刚.吉林省桦甸市大庙子—板庙子金矿化集中区控矿地质条件及找矿靶区预测[D].长春:吉林大学,2005.
Dou Zhigang. Ore-Controlling Geological Conditions and Prospecting Target Prediction in the Dadianzi-Banmiaozi Gold Mineralization Concentration Area of Huadian City[D]. Changchun:Jilin University,2005.

[2] 臧兴运,姜建军,李德洪,等.夹皮沟金成矿带成矿模式讨论[J].吉林地质,2020,39(3):1－14.
Zang Xingyun, Jiang Jianjun, Li Dehong, et al. Discussion on Metallogenic Model of Jiapigou Gold Metallogenic Belt[J]. Jilin Geology,2020,39(3): 1－14.

[3] 孙忠实,冯亚民.吉林夹皮沟金矿床主成矿时代的确定及找矿方向[J].地球学报,1997,18(4):367－372.
Sun Zhongshi,Feng Yamin. Determination of the Main Mineralization Epoch of the Jilin Jiapigou Gold Deposit and Directions for Prospecting[J]. Acta Geologica, 1997,18(4):367－372.

[4] 李碧乐,陈广俊,宋宗维.论吉林夹皮沟金矿成矿时代[J].世界地质,2004,23(4):354－359.
Li Bile, Chen Guangjun, Song Zongwei. Discussion on Minerogenetic Epoch of the Gold Deposit in Jiapigou of Jilin Province[J]. Global Geology,2004,23(4):354－359.

[5] 李俊建,沈保丰,毛德宝,等.吉林夹皮沟金矿成矿时代的研究[J].地质学报,1996,70(4):335－341.
Li Junjian, Shen Baofeng, Mao Debao, et al. Metallogenic Epochs of the Jiapigou Gold Deposit,Jilin [J]. Journal of Geology,1996,70(4):335－341.

[6] 韩吉龙,孙景贵,张勇,等.中国东北部夹皮沟矿集区金矿成矿过程:来自冰湖沟金矿床锆石U－Pb定年和微量元素示踪[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):728－747.
Han Jilong, Sun Jinggui, Zhang Yong, et al. Au Mineralization Process in the Jiapigou Mining District of Northeast China: Evidences from U－Pb Dating and Trace Element of Zircon of the Binghugou Gold Deposit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2023,53(3):728－747.

[7] 刘红涛,柯学进,王安平,等.华北陆块北缘东段夹皮沟金矿带的剪切脉系[J].地质力学学报,2002,8(1):57－71.
Liu Hongtao, Ke Xuejin, Wang Anping, et al. Shear Vein System in Jiapigou Gold Belt of Eastern Segment of Morthern Margin of North China Block[J]. Journal of Geomechanics,2002,8(1):57－71.

[8] 李碧乐,孙丰月,姚凤良.吉林省夹皮沟金矿区控矿构造研究[J].地质找矿论丛,2003,18(2):113－118.
Li Bile, Sun Fengyue, Yao Fengliang. Study on the Ore-Cntrolling Structures at Jiapigou Area, Jilin Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research,2003,18(2):113－118.

[9] 孙景贵,刘阳,徐智恺,等.试论中国东北部陆缘晚中生代浅成热液大规模成矿与深部地质过程对成矿制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):651－692.
Sun Jinggui, Liu Yang, Xu Zhikai, et al. Large-Scale

Epithermal Mineralization of Late Mesozoic and the Constraints of Deep Geological Processes on Mineralization in the Continental Margin of NE China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023,53(3):651-692.

[10] 张永哲,成山林,李跃东,等.多源信息找矿预测技术研究及其应用:以吉林省砂金沟金矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6):1855-1866.
Zhang Yongzhe, Cheng Shanlin, Li Yuedong, et al. Research and Application of Multi-Source Information for Ore Prospecting and Prediction: Taking Jilin Shajingou Gold Deposit as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2022,52(6):1855-1866.

[11] 张笑天.中国东北部陆缘夹皮沟矿田金矿床地质、地球化学特征与成矿作用研究[D].长春:吉林大学,2018.
Zhang Xiaotian. Research on Geology, Geochemistry and Metallogenesis of the Gold Deposits of the Jiapigou Ore Field in the Continental Margin of Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[12] 吾克依拉·吾铁朴.吉林省夹皮沟成矿区金矿多元信息成矿预测[D].长春:吉林大学,2019.
Wutiepu Wukeyila. Multi-Information Metallogenic Prediction of Gold Deposits in Jiapigou Metallogenic Belt, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[13] 张笑天,孙景贵,韩吉龙,等.吉林夹皮沟金矿集区三道岔金矿床成矿流体来源与演化:流体包裹体和 H-O 同位素的制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):748-766.
Zhang Xiaotian, Sun Jinggui, Han Jilong, et al. Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids of the Sandaocha Gold Deposit in the Jiapigou Glod Ore Concentration Area, Jilin Province: Constraints from Fluid Inclusions and H-O Isotopes[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2023,53(3):748-766.

[14] 李亮.吉林省夹皮沟—海沟金成矿带金矿床成矿流体特征与深部成矿潜力评价[D].长春:吉林大学,2016.
Li Liang. Research on Ore-Forming Fluids of Gold Deposits in Jiapigou-Haigou Gold Belt, Jilin Province and Deep-Seated Metallogenic Assessment[D]. Changchun:Jilin University,2016.

[15] 杨利亚,杨立强,袁万明,等.造山型金矿成矿流体来源与演化的氢-氧同位素示踪:夹皮沟金矿带例析[J].岩石学报,2013,29(11):4025-4035.
Yang Liya, Yang Liqiang, Yuan Wanming, et al. Origin and Evolution of Ore Fluid for Orogenic Gold Traced by H-O Isotopes: A Case from the Jiapigou Gold Belt, China[J]. ActaPetrologica Sinica, 2013, 29(11):4025-4035.

[16] 孙忠实,冯本智,青晓.吉林夹皮沟金矿稳定同位素地质及找矿方向[J].长春科技大学学报,1998,28(2):142-147.
Sun Zhongshi, Feng Benzhi, Qing Xiao. The Stable Isopotic Geology and Exploration Direction of the Jiapigou Gold Ore Deposit, Jilin Province[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1998,28(2):142-147.

[17] 刘劲鸿.吉林夹皮沟—金城洞花岗绿岩带中金矿床的形成时代[J].吉林地质,1989,8(4):58-70.
Liu Jinhong. The Formation Age of Gold Deposits in the Jiapigou-Jinchengdong Granite-Green Stone Belt in Jilin Province[J]. Jilin Geology, 1989, 8(4):58-70.

[18] 王存柱,徐明芳,刘长纯,等.吉林桦甸地区二道甸子金矿床成因与成矿背景研究[J/OL].吉林大学学报(地球科学版),2023,53. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230201.
Wang Cunzhu, Xu Mingfang, Liu Changchun, et al. Fluid Inclusion, H-O-S-P Isotope and Metallogenic Epoch of the Erdaodianzi Gold Deposit in Huadian, Jilin Province[J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023,53.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230201.

[19] 关键.吉林东南部贵金属及有色金属成矿规律研究[D].长春:吉林大学,2005.
Guan Jian. Study on Metallogenetic Law of Precious and Non Ferrous Deposits in the Southeast Part of Jilin Province[D]. Changchun:Jilin University,2005.

[20] 孙雪峰.吉林省夹皮沟矿集区小北沟东山金矿地质特征及找矿远景[D].长春:吉林大学,2018.
Sun Xuefeng. Geological Characteristics and Prospecting Perspective of Xiaobeigou Dongshan Gold Deposit in Jiapigou Ore-Concentrated Area, Jilin Province[D]. Changchun:Jilin University,2018.

[21] 赵明洲,孙武.吉林省桦甸县苇厦子—老牛沟一带上太古界三道沟群的划分[J].吉林地质,1983,4(1):31-41.
Zhao Mingzhou, Sun Wu. Division of the Late Archean Sandaogou Group in Weishazi-Laoniugou of Huadian County, Jilin Province [J]. Jilin Geology,

1983,4(1):31-41.

[22] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等.流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2004.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions[M]. Beijing:Science Press,2004.

[23] 周瑞辉,林木森,吴久芳,等.滇东南荒田钨矿床成矿流体来源及演化:来自白钨矿地球化学特征的约束[J]. 地质通报,2023,42(10):1728-1744.
Zhou Ruihui, Lin Musen, Wu Jiufang, et al. Source and Evolution of Ore-Forming Fluids in the Huanglian Tungsten Deposit in Southeadern Yunnan: Constraits from Geochemistry Characteristics of Schedite[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(10):1728-1744.

[24] 贾宏翔,陈仁义,薛建玲,等.辽宁白云金矿流体包裹体研究:对流体演化及成矿机制的指示[J]. 地质通报,2022,41(11):2065-2080.
Jia Hongxiang, Chen Renyi, Xue Jianling, et al. Research on Fluid Inclusions of the Baiyun Gold Deposit, Liaoning Province: Implications for Fluid Evolution and Metalogenic Mechanism[J]. Geological Bulletin of China,2022,41(11):2065-2080.

[25] 张理刚.成岩成矿理论与找矿[M]. 北京:北京工业大学出版社,1989.
Zhang Ligang. Theory of Diagenesis, Metallogeny and Exploration [M]. Beijing: Beijing University of Industry Press,1989.

[26] 高金亮,刘嘉麒,郭正府,等.双辽新生代玄武岩及地幔捕虏体内流体的组成、碳同位素特征及其来源[J]. 岩石学报,2017,33(1):81-92.
Gao Jinliang, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu, et al. Chemical and Carbon Isotopic Compositions of Volatiles in Shuangliao Cenozoic Basalts and Related Mantle Xenoliths: Implications for Origins of Volatiles[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017,33(1):81-92.

[27] 樊祺诚,刘若新,彭礼贵.我国东南沿海地区地幔流体性质及其意义[J]. 科学通报,1992,37(17):1584-1587.
Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Peng Ligui. Characteristics of Mantle Fluids and Their Significance in the Southeastern Coastal Region of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1992,37 (17): 1584-1587.

[28] 储雪蕾,樊祺诚,刘若新,等.中国东部新生代玄武岩中超镁铁质捕虏体的CO_2包裹体的碳、氧同位素初步研究[J]. 科学通报,1995,40(1):81-92.
Chu Xuelei, Fan Qicheng, Liu Ruoxin, et al. Preliminary Study on Carbon and Oxygen Isotopes of CO_2 Inclusions in Ultramafic Xenoliths from Cenozoic Basalts in Eastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(1):81-92.

[29] 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(增刊):27-30.
Sun Fengyue, Jin Wei, Li Bile, et al. A Think About Hydrothermal Vein Gold Deposits on the Depth of Mineralization[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2000,30(Sup.):27-30.

[30] 王建新,孙丰月,臧兴运,等.吉林板庙子金矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(5):1053-1061.
Wang Jianxin, Sun Fengyue, Zang Xingyun, et al. Characteristics of the Fluid Inclusion of Banmiaozi Gold Deposit, Jilin Province and Their Geological Significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2010,40(5):1053-1061.

[31] Roedder E, Bodnar R J. Geologic Pressure Determinations from Fluid Inclusion Studies [J]. Annal Review of Earth and Planetary Sciences,1980, 8:263-301.

[32] 薛斌.吉林省夹皮沟金矿带三道岔-四道岔矿区矿体隆升剥露与保存变化[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.
Xue Bin. The Uplifting and Denudation, Post-Ore Change and Preservation of Sandaocha and Sidaocha Gold Deposits in the Jiapigou Gold Belts[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2012.

[33] 代军治,王可勇,程新民,等.吉林夹皮沟立山金矿床流体包裹体特征及成矿温度[J]. 地球学报,2005,26(1):21-24.
Dai Junzhi, Wang Keyong, Cheng Xinmin, et al. The Fluid Inclusion Features and Metallogenic Temperature of the Lishan Gold Deposit in Jiapigou, Jilin Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(1):21-24.

[34] 冯洋洋.吉林省夹皮沟八家子矿床成因研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
Feng Yangyang. A Study on the Genesis of Bajiazi Gold Ore in Jiapigou, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University,2017.

[35] 贺云鹏.吉林省夹皮沟矿集区六批叶矿田金成矿作用研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
He Yunpeng. Research on Gold Metallogenesis of the Liupiye Orefield of the Jiapigou Gold Ore District in

Jilin Province[D]. Changchun:Jilin University,2018.

[36] 陈柏林,董法先,李中坚.韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评,1999,45(3): 186 - 192.
Chen Bolin, Dong Faxian, Li Zhongjian. Ductile Shear Zone-Type Gold Mineralization Model [J]. Geological Review, 1999, 45(3):186 - 192.

[37] 李瑞翔,高书剑,薛冰,等. 胶东三山岛超巨型金矿床三维地质模型及深部矿体与断裂的耦合关系[J]. 地质通报,2022,41(6):968 - 976.
Li Ruixiang,Gao Shujian,Xue Bing, et al. The Three-Dimensional Geological Model and the Coupling Relationship Between Deep Ore Body and Fault of Sanshandao Super Giant Gold Deposit in Jiaodong[J]. Geological Bulletin of China, 2022,41(6):968 - 976.

[38] 严光生,叶天竺,庞振山,等. 成矿地质体找矿预测理论与方法[J]. 地质通报,2023,42(6):857 - 882.
Yan Guangsheng,Ye Tianzhu,Pang Zhenshan, et al. Introduction of the Theory and Method of Propecting Prediction of Metallogenic Geological Body[J]. Geological Bulletin of China,2023,42(6):857 - 882.

[39] 鲍兴隆,钱建平,孙俊磊,等. 胶西北地区谢家沟金矿床构造控矿规律及找矿方向[J]. 地质通报,2024,43(5):680 - 691.
Bao Xinglong,Qian Jianping,Sun Junlei, et al. Ore-Controlling Structure and Exploration Target of Xiejiagou Gold Deposit in Northwest Jiaodong Area [J]. Geological Bulletin of China,2024,43(5): 680 - 691.

[40] 王珊珊,鲍中义,戴长国,等. 胶东主要金矿类型流体包裹体特征对比及其对成矿环境差异的指示:以纱岭、旧店和辽上金矿床为例[J]. 地质通报,2022,41(6) :1081 - 1094.
Wang Shanshan,Bao Zhongyi,Dai Changguo, et al. Comparisons of the Fluid Inclusions in the Main Types of Gold Deposits in Jiaodong Area and the Indication on Their Metallogenic Conditional Differences: A Case Study of Shaling, Jiudian and Liaoshang Gold Deposits[J]. Geological Bulletin of China,2022,41(6):1081 - 1094.

[41] 刘琦,丁成武,戴盼,等.图古日格金矿床方解石 C、O 同位素特征及其意义[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54.doi/10.13278/j.cnki.jjuese.20230233.
Liu Qi, Ding Chengwu, Dai Pan, et al. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Hydrothermal Calcites from Tugurige Deposit and Their Significances [J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54. doi/10.13278/j.cnki.jjuese.20230233.

[42] 于重远,李跃东,张永哲.吉林夹皮沟矿集区二道沟金矿床稀土元素特征与成矿模式[J]. 黄金,2022,43(5):28 - 34.
Yu Zhongyuan, Li Yuedong, Zhang Yongzhe. Rare Earth Elements Characteristics and Metallogenic Pattern of Erdaogou Gold Deposit,Jiapigou High Ore Concentration Area,Jilin[J]. Gold,2022,43(5):28 - 34.

[43] 于景山.吉林板庙子金矿地质特征及隐伏矿体预测[D]. 长春:吉林大学,2018.
Yu Jingshan. Geological Characteristics and Propecting on Blinded Ore Bodes of Banmiaozi Gld Deposit, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University,2018.

[44] 侯刚,丁玉亮.夹皮沟金矿床深部南北向蚀变岩型矿体及找矿意义[C]//中国矿业科技文汇.沈阳:现代矿业杂志社, 2016:147 - 152.
Hou Gang, Ding Yuliang. Deep South-North Trending Altered Rock Orebody in Jiapigou Gold Deposit and Its Prospecting Significance[C]//China Mining Science and Technology Conference. Shenyang:Modern Mining Magazine,2016:147 - 152.