

大兴安岭北段八分场银矿床的发现及其成矿流体特征

乌日根¹, 庄倩¹, 张爽², 李新鹏¹, 邓昌州³

(1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江哈尔滨 150036; 2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074;
3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081)

[摘要]大兴安岭北段多宝山地区是我国重要的铜钼金成矿区, 近年来, 二道坎和八分场银矿床的相继发现表明该地区银同样具有巨大的找矿潜力。以往研究热点主要集中在铜钼金等矿种, 而对银矿床成矿流体性质和矿床成因的认识均极为薄弱, 新发现的八分场银矿床为研究该地区银成矿作用提供了可能。本文在开展八分场银矿床地质特征和流体包裹体特征研究工作的基础上, 结合与二道坎银矿床的对比分析, 总结归纳二者的异同, 旨在为区域找矿和深化成矿理论研究提供借鉴和参考。八分场银矿床矿体受NNE向断裂构造控制, 呈脉状赋存在构造角砾岩中。矿床的形成主要经历了以下四个阶段: 早期石英-磁铁矿阶段、成矿前期石英-黄铁矿阶段、主成矿期石英-银-多金属硫化物阶段和晚期碳酸盐-石英-少硫化物阶段。主成矿阶段石英中流体包裹体的研究显示, 流体包裹体类型主要为气液两相包裹体, 均一温度峰值集中于190~220℃, 盐度集中于1.9%~4.1% NaCleqv, 密度变化于0.82~0.92 g/cm³。流体成矿压力在9.9~22.6 MPa, 估算成矿深度为1.0~2.3 km。氢氧同位素显示, 流体δ¹⁸O变化范围在1.3‰~1.9‰, δD变化范围在-110.8‰~-89.1‰。总体上, 成矿流体显示出中低温、低盐度、低密度和低压的特征, 与区域上新发现的二道坎银矿床类似, 成矿流体皆为岩浆水和大气降水的混合, 所不同的是八分场银矿床由岩浆水主导, 且形成深度更深。本文研究表明, 多宝山地区具有较大的银成矿潜力, 有望成为国内新的银多金属矿产聚集地, 银成矿作用不仅发生在地表浅处(以二道坎为代表), 深部仍具有较大的找矿潜力(以八分场为代表)。

[关键词] 流体包裹体 成矿流体 氢氧同位素 矿床学 八分场银矿床 大兴安岭

[中图分类号] P597; P611 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2023)01-0012-15

Wu Rigen, Zhuang Qian, Zhang Shuang, Li Xinpeng, Deng Changzhou. Discovery of the Bafen-chang silver deposit and its ore-forming fluids characteristics in the northern Great Xing'an Range[J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(1): 0012-0026.

0 引言

中国东北地区位于中亚造山带最东端, 西伯利亚和东北克拉通之间(图1a), 其大地构造格局具有多板块拼合的特点, 自东向西包括佳木斯地块、松嫩地块、兴安地块和额尔古纳地块(图1b)。大兴安岭成矿带作为中国东北地区重要的成矿带之一, 具有丰富的铜、钼、金、碲、锑等矿产资源(赵一鸣等, 1997; 赵元艺等, 2011; Liu et al., 2012)。受古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋3大构造域的影响

(Jahn et al., 2004; Liu et al., 2012; 徐备等, 2014; Gao et al., 2016; Zhou et al., 2017; Deng et al., 2021), 大兴安岭构造-岩浆活动强烈, 成矿类型多样(Liu et al., 2012; Gao et al., 2016; Deng et al., 2021)。多宝山矿集区位于兴安造山带东段, 兴安地块与松嫩地块的拼合带附近, 自古生代以来经历了多期复杂的构造演化, 并引起了区域上大量的岩浆活动(Jahn et al., 2004; Wu et al., 2011; Gao et al., 2016; Zhou et al., 2017; 乌日根等, 2021), 是大兴安岭成矿带重要的铜、钼、金成矿区(赵一鸣等, 1997; 刘扬等,

[收稿日期] 2022-10-18; [改回日期] 2022-12-19; [责任编辑] 宗兆建。

[基金项目] 黑龙江省矿产勘查基金项目“黑龙江省黑河市金水农场八分场530.8高地金银多金属矿普查”(编号: SDKC-2019002)资助。

[第一作者] 乌日根(1984年-), 男, 2015年毕业于中国地质大学(武汉), 地质工程专业, 获硕士学位, 高级工程师, 主要从事矿床学与地球化学研究工作。E-mail: 264950191@qq.com。

[通讯作者] 张爽(1985年-), 女, 2013年毕业于中国地质大学(武汉), 地球化学专业, 获博士学位, 讲师, 主要从事勘查地球化学教学与研究工作。E-mail: 01504230@163.com。

2008;赵元艺等,2011;武广等,2014;佟匡胤等,2015; Zhou et al., 2017;乌日根等,2021)。区内除产出有多宝山、铜山、三矿沟等大型铜铅(铁)矿床外,又相继发现了三道湾子、争光、孟德河等大型岩金矿床。以往研究者对斑岩/矽卡岩型铜铅矿床(赵一鸣等,1997;刘扬等,2008;赵元艺等,2011;武广等,2014)、浅成低温热液型金矿床(吕军等,2009;邓轲等,2013;Sun et al., 2013;武广等,2014;车合伟等,2016;李成禄,

2018;赵忠海等,2021)的成矿流体特征开展了较为详细的研究工作。大多数研究认为,浅成低温热液型金矿床主要受早白垩世古太平洋板块俯冲回撤的影响,发育在伸展的构造背景下(周建波等,2012;Sun et al., 2013;Gao et al., 2016;Li et al., 2017;赵忠海等, 2021)。区域上对贵金属银的勘查和研究工作均相对薄弱,从而导致对区域银矿床的成矿类型和流体特征等的认识还处在初级阶段。

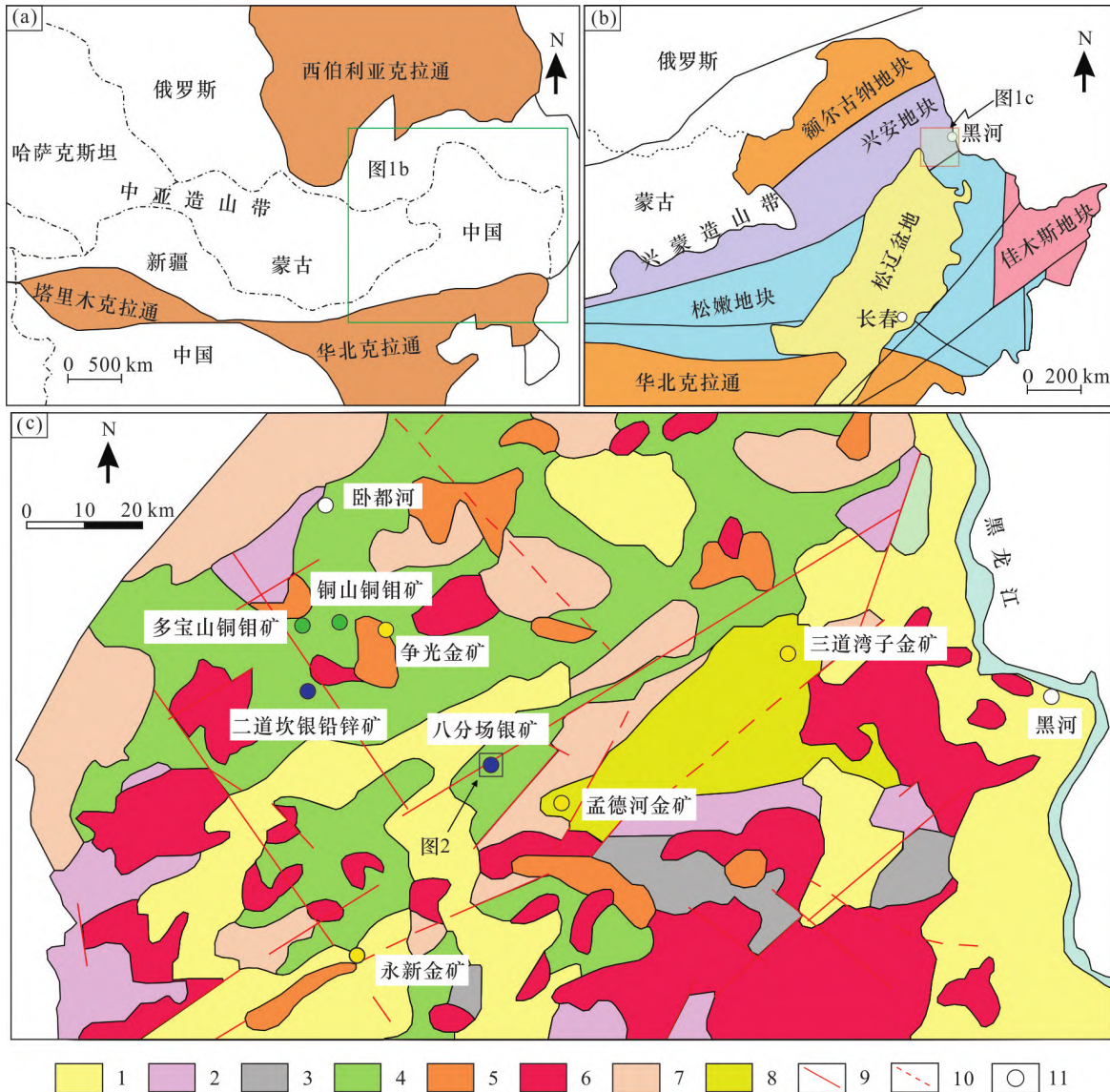


图1 (a)中亚造山带构造示意图(据 Jahn et al., 2004); (b)中国东北地区构造图(据徐备等,2014和 Deng et al., 2021 修改); (c)多宝山地区地质简图(据武广等,2014;袁茂文,2020和 Deng et al., 2021 修改)

Fig.1 (a) Tectonic sketch map of the Central Asian Orogenic Belt (after Jahn et al., 2004); (b) tectonic map of NE China (modified from Xu et al., 2014 and Deng et al., 2021); (c) simplified geological map of the Duobaoshan area (modified from Wu et al., 2014; Yuan, 2020 and Deng et al., 2021)

- 1 - 晚三叠世 - 第四纪火山碎屑岩; 2 - 中晚二叠世 - 早三叠世安山岩、砂岩、粉砂岩; 3 - 石炭世砂岩、板岩; 4 - 奥陶世 - 泥盆世火山碎屑岩;
- 5 - 燕山期花岗岩; 6 - 印支期花岗岩; 7 - 华力西期花岗岩; 8 - 加里东期花岗岩片麻岩; 9 - 断层; 10 - 推测断层; 11 - 城镇
- 1 - volcanic and clastic rock (Upper Triassic to Quaternary); 2 - andesite, sandstone and siltite (Middle - Upper Permian - Lower Triassic); 3 - sandstone and slate (Carboniferous); 4 - volcanic clastic rocks (Ordovician - Devonian); 5 - Yanshanian granite; 6 - Indosinian granite; 7 - Variscan granite; 8 - Caledonian granitic gneiss; 9 - fault; 10 - inferred fault; 11 - city

近年来,由黑龙江省自然资源调查院在大兴安岭北段多宝山地区新发现的二道坎大型银矿床和八分场中型银矿床,为目前在多宝山铜、钼、金矿集区唯二的银多金属矿床,二者成矿特征有相似之处又存在明显差异,其发现是否可以指示区域上具有成为银多金属矿集区的潜力,目前均属空白。因此,有必要对两个矿床的成矿过程进行探讨,这对推动区域找矿工作具有十分重要的意义。

矿床矿石和脉石中流体包裹体可以提供成矿流体的物理化学信息,对成矿环境和流体演化等具有重要的指示作用(Hall et al., 1988; Brown, 1989; Norman et al., 1994; Mernagh et al., 2007; 邓轲等, 2013),其作为约束矿床成矿机制的有效手段而备受关注(Mernagh et al., 2007; 邓轲等, 2013; 车合伟等, 2016)。本文选取八分场银矿床为研究对象,在详实的野外工作基础上,系统归纳了八分场银矿床的地质特征,划分出四个成矿阶段,并对主成矿期开展详细的流体包裹体岩相学、显微测温研究和氢氧同位素测试,分析成矿流体特征,探讨矿床成因类型,并通过与二道坎银矿床进行系统的对比,总结成矿规律,为区域找矿和深化成矿理论研究提供借鉴和参考。

1 区域地质背景

多宝山矿集区为典型的岛弧环境(周建波等, 2012; Gao et al., 2016; 袁茂文, 2020; Deng et al., 2021),自古生代以来,区域上经历了西伯利亚板块与华北板块之间一系列微板块复杂的拼贴和古亚洲洋的构造演化与最终闭合(Zhang et al., 2010; Liu et al., 2012; Zhou et al., 2017; 刘宝山等, 2021)。古生代早期,受古亚洲洋构造域的控制,多宝山地区处于活动大陆边缘的构造背景。晚古生代-早中生代,区域上又经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋的闭合及多块体拼合的过程(Jahn et al., 2004; Wu et al., 2011; Gao et al., 2016; Zhou et al., 2017; Deng et al., 2021),多宝山地区进入了碰撞后的伸展环境(Wu et al., 2011; 周建波等, 2012; Liu et al., 2017; 袁茂文, 2020)。中生代晚期,古太平洋板块向西俯冲,区域上发生了大规模的岩浆作用和火山热液活动(Jahn et al., 2004; Wu et al., 2011; Liu et al., 2012; 徐备等, 2014; Gao et al., 2016)。

区域上出露的地层主要为早古生代和中生代火山碎屑岩,以及少量晚古生代-早中生代沉积碎屑岩。早古生代地层主要为铜山组($O_{1-2}t$)和多宝山

组($O_{1-2}d$),主要为中酸性火山碎屑岩。泥鳅河组(S_4D_2n)和腰桑南组(D_2y)主要由砂岩、板岩夹少量火山岩组成。中生代地层主要为下白垩统龙江组(K_1l)和光华组(K_1gn),岩性为中性-中酸性火山碎屑岩,九峰山组(K_1j)主要为砂砾岩,夹煤层(图1c)。区域上岩浆活动频繁,侵入岩以晚古生代和中生代花岗岩类为主(徐备等, 2014; 袁茂文, 2020; Deng et al., 2021),多沿NE向和NW向断裂交汇部位侵入,常以岩株和小岩体形式产出。区内构造复杂,早期的NE向断裂为区域上主要的导矿构造(刘扬等, 2008; 周建波等, 2012; 武广等, 2014; 佟匡胤等, 2015; 乌日根等, 2021),以压性、压扭性断裂为主。NW向、NNE向次级张扭性断裂是区域上主要的控矿和容矿构造(Zhang et al., 2010; Gao et al., 2016; 乌日根等, 2021),沿这些张性裂隙出露大量侵入岩体和含矿石英脉,并控制金、银等矿产分布。

多宝山地区主要经历三期构造事件(刘扬等, 2008; Wu et al., 2011; Li et al., 2017; Deng et al., 2021):加里东期主要表现为NW向构造,该期构造对斑岩型铜钼矿床的形成起到了重要作用,代表性矿床为多宝山和铜山斑岩/矽卡岩型铜钼矿床,其成矿时代约为480~470 Ma(赵一鸣等, 1997; Liu et al., 2012);印支期构造运动主要表现为NEE向,该期主要形成了二道坎银矿和孟德河金矿,其成矿时代约为235~210 Ma(李成禄, 2018; 袁茂文, 2020; 刘宝山等, 2021);燕山期构造运动可分为早晚两期,早期继承了印支期NEE向构造,晚期表现为NE向的深大左行走滑构造,该期形成的矿床主要与火山活动有关,如三道湾子浅成低温热液型金矿床,该类矿床的成矿时代约为125~100 Ma(Zhang et al., 2010; Sun et al., 2013; 武广等, 2014; 赵忠海等, 2021)。

2 矿区地质

八分场银矿床位于多宝山岛弧南部,中生代火山构造断陷盆地南缘的隆起区(乌日根等, 2021)。矿区内出露的地层主要为中泥盆统腰桑南组(D_2y)和下白垩统光华组(K_1gn)(图2a)。腰桑南组为一套单斜地层,倾向 $90^\circ \sim 130^\circ$,倾角 $20^\circ \sim 40^\circ$,岩石类型主要为凝灰砂岩、粉砂岩、变质砂岩和砂质板岩,局部发育有火山岩。光华组不整合覆盖于腰桑南组之上,其岩性主要为流纹岩、流纹质火山碎屑岩、英安岩和英安质火山碎屑岩等,为陆相中酸性火山岩组合。

八分场银矿床目前为 1 个矿(化)带 10 条银矿体。银矿(化)带在地表呈 NNE 向条带状展布,长度约 500 m,宽度约 300 m,产于腰桑南组沉积微变质地层的破碎带中。银矿体主要赋存在构造角砾岩和强硅化变质砂岩中,少量赋存于石英脉中,受构造控制,产状大致与 NNE 向断裂一致,局部具有膨大缩小和尖灭再现现象(图 2b)。银矿体呈脉状和透

镜状展布,走向约 15°,倾向 100°~110°,倾角 45°~60°,长度一般在 100~300 m,延伸 300~500 m,部分矿体延伸 >500 m,深部未封闭。真厚度在 0.82~24.0 m,银最高品位 770.1 g/t,平均品位 91.2~344.4 g/t,共(伴)生铅平均品位 0.15%~1.24%,锌平均品位 0.06%~1.14%。银矿体品位变化系数为 35.43%,有用组分分布均匀。

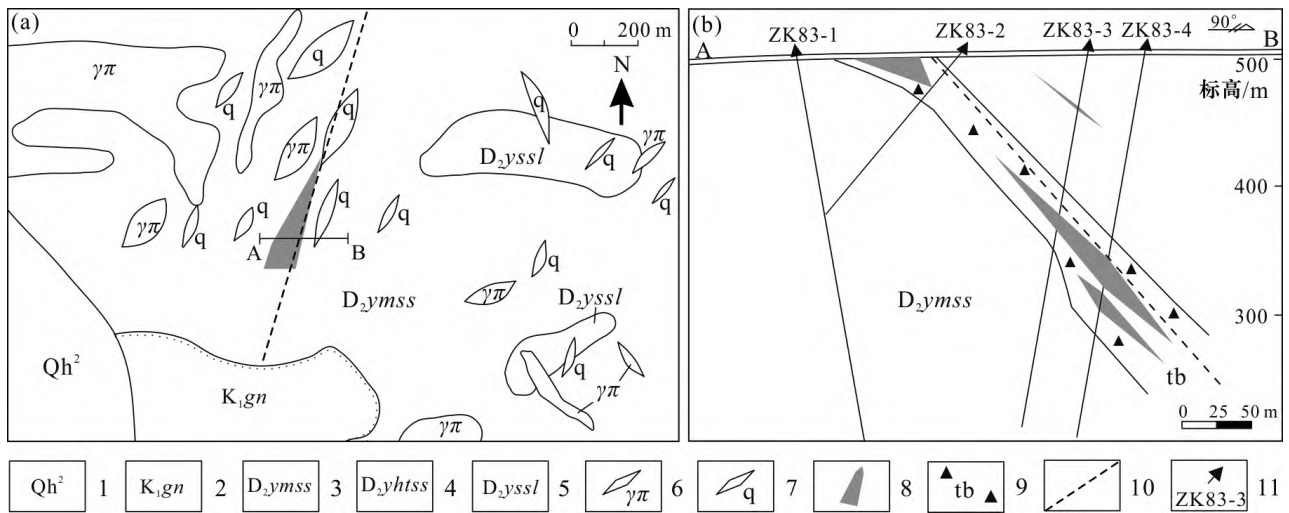


图 2 八分场银矿床矿区地质简图(a)及 83 勘探线剖面图(b)(据乌日根等,2021 修改)

Fig. 2 Geological map of the Bafenchang silver deposit (a) and Line 83 profile (b) (modified from Wu et al., 2021)

1 - 第四系; 2 - 光华组; 3 - 腰桑南组变质砂岩; 4 - 腰桑南组凝灰砂岩; 5 - 腰桑南组砂质板岩; 6 - 花岗斑岩; 7 - 石英脉; 8 - 矿体; 9 - 构造角砾岩带; 10 - 断裂; 11 - 钻孔

1 - Quaternary; 2 - Guanghua Formation; 3 - metasediments of Yaosangnan Formation; 4 - tuffaceous sandstone of Yaosangnan Formation; 5 - sandy slate of Yaosangnan Formation; 6 - granite porphyry; 7 - quartz vein; 8 - orebodies; 9 - structural breccia zone; 10 - fault; 11 - drill hole

八分场银矿床的矿石矿物主要为磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、黝铜矿、黄铜矿等(图 3a~1)。脉石矿物主要为石英、方解石和绢云母,其次为绿泥石和绿帘石。矿石的主要结构有自形-半自形粒状结构、它形晶粒状结构和角砾结构,其次为脉状穿插结构、交代残余结构和包含结构。矿石构造以角砾状构造为主,其次为块状构造、浸染状构造和网脉状构造。矿石自然类型为原生硫化物矿石,银、铅锌等矿物彼此共生,总体上银与铅锌呈正相关关系(表 1)。从银的物相分析结果可以看出(表 2),矿石中银约 53% 赋存在硫化物中,45% 包裹在石英和硅酸盐中,约 1% 呈游离自然银。

根据矿物共生组合,可将八分场流体成矿划分为 4 个成矿阶段(表 3): 第一阶段为石英-磁铁矿阶段,标志性矿物为石英、磁铁矿(图 4a),代表了早期高温阶段,该阶段未见银矿化。第二阶段为石英-黄铁矿阶段,标志性矿物为石英、黄铁矿

(图 4b),属于成矿前期阶段。此阶段硫化物类型较单一,主要为黄铁矿,多呈自形-半自形粒状发育在石英中,交代早期的磁铁矿(图 4c)。流体中银含量较低,未形成矿体;第三阶段为石英-银-多金属硫化物阶段,标志性矿物为石英、多金属硫化物(图 4d)。含矿热液沿 NNE 向构造裂隙胶结早期的石英脉和围岩,局部形成含矿的构造角砾岩(图 4e)。多金属硫化物与银矿物紧密共生,主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿和黄铁矿(图 4f、g、h、i)。辉银矿多呈不规则状分布在黄铁矿、石英、方铅矿、闪锌矿等矿物的颗粒间或裂隙中(图 4j),该阶段为银的主要成矿阶段;第四阶段为碳酸盐-石英-少硫化物阶段,标志性矿物为方解石、石英,方解石多呈细脉状,方解石脉中几乎不含硫化物,偶见少量细脉状自形黄铁矿,矿化不发育,该阶段为成矿晚期阶段(图 4k)。表生氧化期表现为褐铁矿化,主要呈块状和蜂窝状产出(图 4l)。

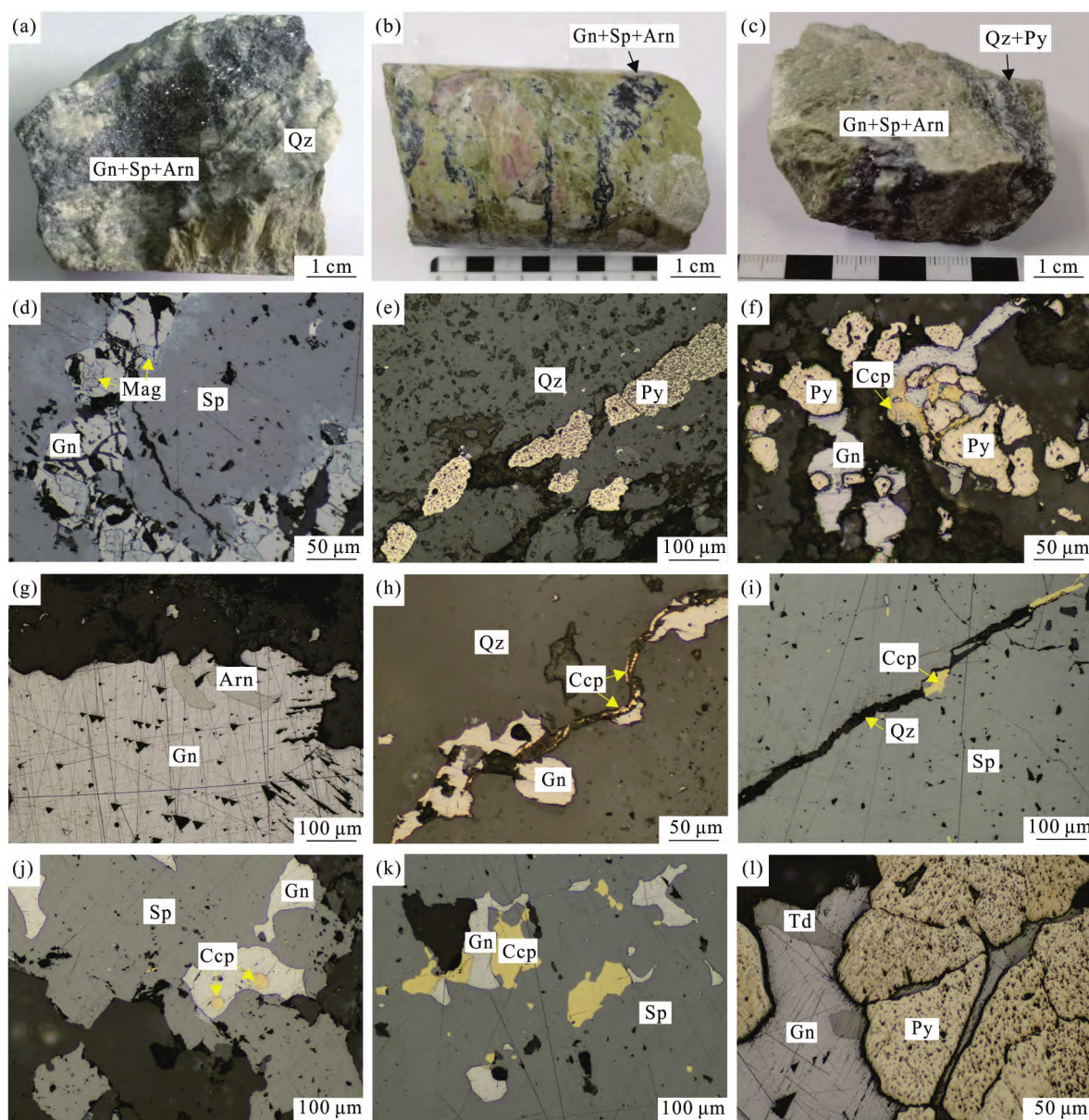


图3 八分场银矿床矿化特征

Fig. 3 Mineralization characteristics of the Bafenchang silver deposit

a ~ c - 细脉浸染状多金属硫化物矿石; d - 方铅矿中包裹早期的磁铁矿; e - 黄铁矿沿石英裂隙灌入; f - 黄铜矿与方铅矿充填早期黄铁矿; g - 辉银矿交代方铅矿; h - 黄铜矿与方铅矿沿石英微裂隙发育; i - 黄铜矿和石英沿微裂隙灌入闪锌矿; j - 方铅矿、闪锌矿共生, 方铅矿包裹黄铜矿; k - 方铅矿、闪锌矿和黄铜矿共生; l - 在黄铁矿裂隙中发育的方铅矿和黝铜矿; Arn - 辉银矿; Ccp - 黄铜矿; Gn - 方铅矿; Mag - 磁铁矿; Py - 黄铁矿; Qz - 石英; Sp - 闪锌矿; Td - 黝铜矿

a ~ c - veinlet - disseminated polymetallic sulfide ore; d - early - stage magnetite in galena; e - pyrite in quartz crevice; f - chalcopyrite and galena in the early - stage pyrite; g - galena replaced by argentite; h - chalcopyrite and galena developed along quartz crevice; i - chalcopyrite and quartz distributed along sphalerite; j - coeval of galena and sphalerite, chalcopyrite included by galena; k - coeval of galena, sphalerite, and chalcopyrite; l - galena and tetrahedrite distributed in pyrite crevice; Arn - argentite; Ccp - chalcopyrite; Gn - galena; Mag - magnetite; Py - pyrite; Qz - quartz; Sp - sphalerite; Td - tetrahedrite

表1 八分场银矿床矿石化学成分表

Table 1 Chemical compositions of ores from the Bafenchang silver deposit

样品编号	$w_B/\%$											$w_B/10^{-6}$			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cu	Pb	Zn	Au	Ag
ZK87 - 5S1	57.92	12.04	2.87	3.60	3.49	3.61	0.88	4.34	0.43	0.18	0.46	1.27	0.07	0.21	703.30

续表 1

Continued Table 1

样品编号	$w_B/\%$													$w_B/10^{-6}$	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cu	Pb	Zn	Au	Ag
ZK83-3S2	61.12	7.55	2.56	5.48	1.86	0.31	0.44	6.60	0.37	0.16	0.12	1.13	2.82	0.10	277.00
ZK83-4S3	58.10	10.45	3.11	6.15	1.96	1.66	0.52	7.41	0.32	0.14	0.33	0.04	0.08	0.17	210.20
ZK83-4S4	65.26	11.57	1.81	3.90	1.70	0.81	0.47	4.70	0.40	0.14	0.10	1.44	0.31	0.10	207.90
ZK83-3S5	60.23	13.28	2.79	4.40	2.62	1.46	0.47	5.30	0.61	0.18	0.04	0.06	0.40	0.08	86.10

注:测试单位:黑龙江省第五地质勘查院;测试时间:2020 年 12 月。

表 2 八分场银矿床银物相分析结果

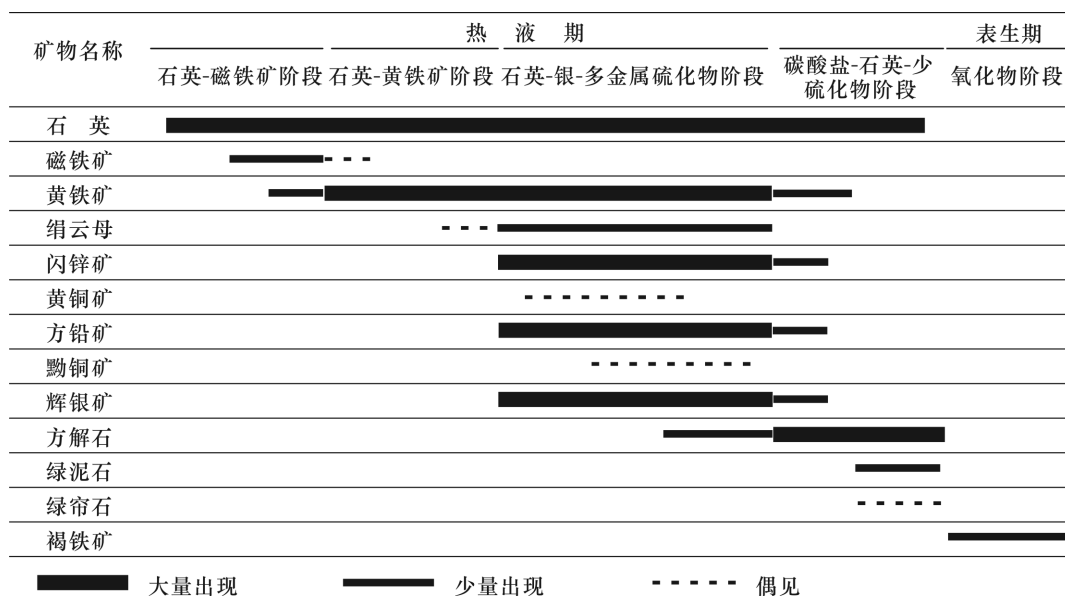
Table 2 Silver phase analyses of the Bafenchang silver deposit

样品	$w(\text{Ag})/10^{-6}$			
	氯化银	游离自然银	硫化银	石英和硅酸盐包裹银
硅化构造角砾岩	2.36	3.29	118.29	100.91

注:测试单位:黑龙江省第五地质勘查院;测试时间:2020 年 10 月。

表 3 八分场银矿床成矿期、成矿阶段、矿物生成顺序表

Table 3 Mineralization periods and stages, paragenetic sequence of minerals in the Bafenchang silver deposit



3 样品测试和计算方法

3.1 样品测试

本次研究选择了 6 件采自八分场银矿床主成矿阶段不同钻孔岩心中的含矿石英流体包裹体样品,进行系统的流体包裹体岩相学、显微测温研究和氢氧同位素研究。

包裹体显微测温实验在廊坊市地智科技有限公司流体包裹体实验室完成,显微测温利用科研级透反射偏光显微镜,搭配 LINKAM THMS600 冷热台,低温分析精度为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ($< 0\text{ }^\circ\text{C}$),高温分析精度

为 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ($> 200\text{ }^\circ\text{C}$),测温中升温速率为 $1\sim 5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,靠近相变点为 $0.2\sim 1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,测温范围为 $-196\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 。

选取与流体包裹体测温同一样品中的石英单矿物进行氢氧同位素分析,测试在北京科荟测试技术有限公司实验室完成。测试选用的仪器主要为美国热电公司的 253plus、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口。为去除样品表面的吸附水,首先将样品装入锡杯在烘箱中烘烤,以 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥 24 小时。样品经过烘烤后,放入填装玻璃碳粒的高温裂解炉中,样品中矿物包体水和含羟基的单矿物在

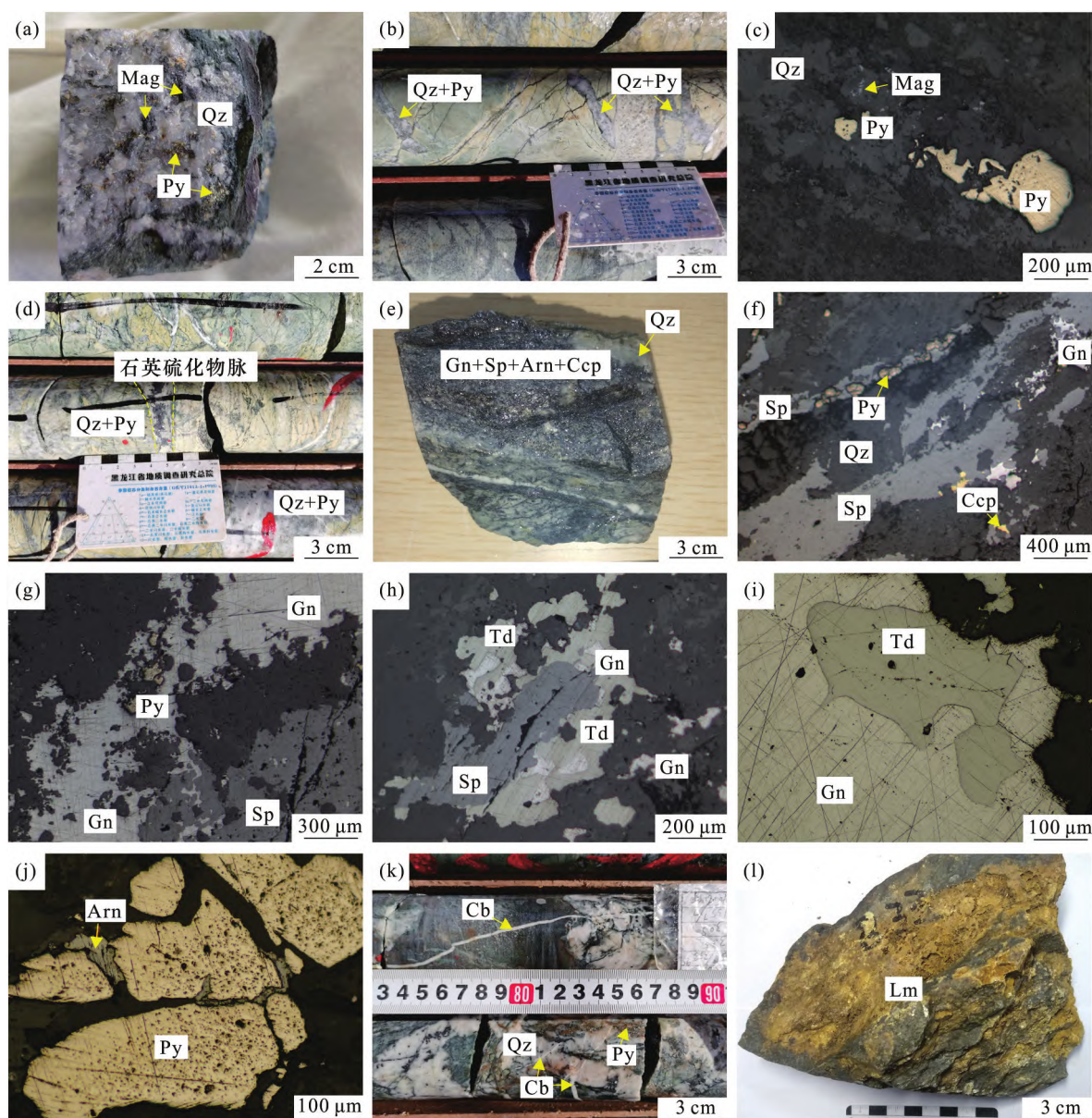


图 4 八分场银矿床矿石特征及镜下照片

Fig. 4 Field and microscopic photographs of the Bafenchang silver deposit

a - 石英 - 磁铁矿阶段; b - 石英 - 黄铁矿阶段; c - 石英、黄铁矿包裹磁铁矿; d - 成矿早期石英 - 黄铁矿脉被主成矿期石英硫化物脉切穿; e - 多金属硫化物矿石; f - 方铅矿、闪锌矿、黄铜矿共生, 闪锌矿包裹早期的黄铁矿; g - 方铅矿、闪锌矿共生, 方铅矿包裹早期的黄铁矿; h - 闪锌矿和方铅矿被黝铜矿交代; i - 黝铜矿与方铅矿共生; j - 在黄铁矿裂隙中发育的辉银矿; k - 碳酸盐脉切割石英黄铁矿脉; l - 表生氧化期; Arn - 辉银矿; Cb - 碳酸盐; Ccp - 黄铜矿; Gn - 方铅矿; Lm - 褐铁矿; Mag - 磁铁矿; Py - 黄铁矿; Qz - 石英; Sp - 闪锌矿; Td - 黝铜矿

a - quartz - magnetite stage; b - quartz - pyrite stage; c - magnetite included in quartz and pyrite; d - early - stage quartz - pyrite vein was crosscut by ore - stage quartz - sulfide vein; e - polymetallic sulfide ore; f - coeval of galena, sphalerite, and chalcopyrite, early - stage included by sphalerite; g - coeval of galena and sphalerite, early - stage pyrite included by galena; h - sphalerite and galena replaced by tetrahedrite; i - argentite developed in pyrite crevice; j - coeval of tetrahedrite and galena; k - quartz - pyrite vein crosscut by carbonate vein; l - supergene oxidation stage; Arn - argentite; Cb - carbonate; Ccp - chalcopyrite; Gn - galena; Lm - limonite; Mag - magnetite; Py - pyrite; Qz - quartz; Sp - sphalerite; Td - tetrahedrite

裂解释放后, 瞬间与玻璃碳反应生成 H_2 和 CO , 高纯氦气(5N)携带生成的 H_2 和 CO 经过色谱柱进入质谱仪, 测定 H_2 的同位素比值 δD , 测定 CO 的同位素比值 $\delta^{18}O$ 。氢氧同位素分析精度分别优于 $\pm 1\%$

和 $\pm 0.2\%$ 。

3.2 计算方法

本文对主成矿阶段流体包裹体进行了系统的显微测温, 对于水溶液包裹体, 利用 Bodnar (1993) 提

出的盐度计算方程,获得流体盐度;利用刘斌和段光贤(1987)提出的密度公式,计算流体密度;根据邵洁涟(1988)提出的成矿压力公式计算流体捕获压力;根据孙丰月等(2000)提出的成矿深度和压力关系式估算成矿深度。

4 分析结果

4.1 包裹体岩相学特征

根据包裹体的成分和室温下的相态,主成矿阶段的包裹体均为水溶液包裹体,未见固体包裹体和熔融包裹体。所见包裹体尺寸均较小,长轴最大约20 μm ,最小不足1 μm ,颜色多为无色透明,少数呈

黑色,室温下均表现为气液两相包裹体。气液两相包裹体又可划分为2种类型:Ⅰ型为富液相包裹体,Ⅱ型为富气相包裹体。用于测温的包裹体主要分布在石英颗粒内部,长轴方向大致相同,均为原生包裹体。

Ⅰ型包裹体约占包裹体总数的80%,大小介于1~15 μm ,多数为5~12 μm ,主要呈棒球状、椭圆状,其次为长方形、短柱状、不规则状(图5中a、b、c),气相分数在20%~40%之间。Ⅱ型包裹体约占包裹体总数的20%,大小介于1~12 μm ,多数为2~6 μm ,主要呈圆形、椭圆形,少数为不规则状,呈群状、自由状分布(图5中d),气相分数在50%~70%之间。

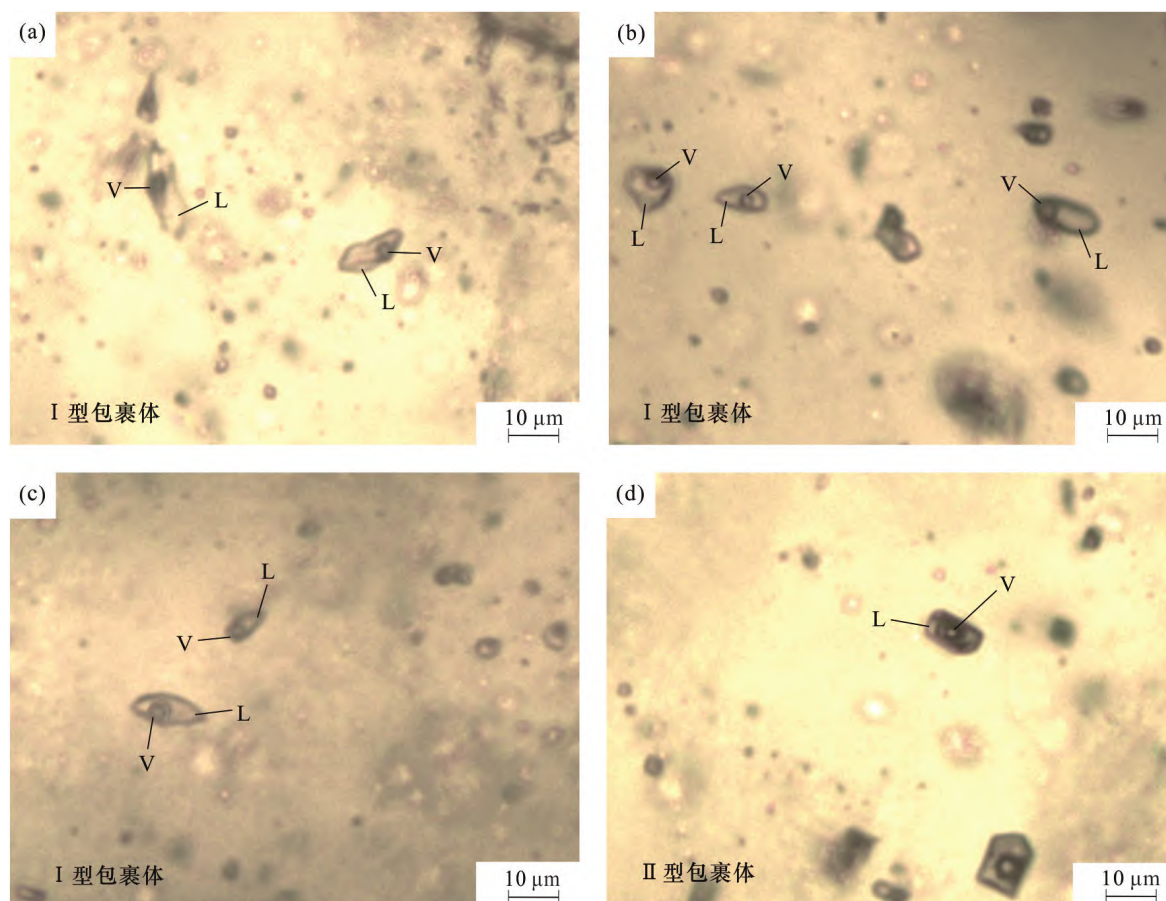


图5 八分场银矿床流体包裹体特征

Fig. 5 Fluid inclusions from the Bafenchang silver deposit

4.2 包裹体显微测温结果

主成矿阶段包裹体的测试结果见表4和图6。包裹体的冰点温度介于 $-2.6 \sim -0.9$ $^{\circ}\text{C}$,其中Ⅰ型包裹体冰点温度变化于 $-2.6 \sim -0.9$ $^{\circ}\text{C}$,Ⅱ型包裹体冰点温度变化于 $-2.4 \sim -1.1$ $^{\circ}\text{C}$ 。流体包裹体的完全均一温度变化于 $172 \sim 245$ $^{\circ}\text{C}$,峰值集中在 $190 \sim 220$ $^{\circ}\text{C}$ 。其中Ⅰ型包裹体完全均一温度变化

于 $172 \sim 232$ $^{\circ}\text{C}$,Ⅱ型包裹体完全均一温度变化于 $185 \sim 245$ $^{\circ}\text{C}$ 。

包裹体的盐度介于 $1.57\% \sim 4.34\%$ NaCl_{eqv} ,主要集中在 $1.9\% \sim 4.1\%$ NaCl_{eqv} 。其中Ⅰ型包裹体盐度介于 $1.57\% \sim 4.34\%$ NaCl_{eqv} ,主要集中在 $1.9\% \sim 4.1\%$ NaCl_{eqv} 。Ⅱ型包裹体盐度介于 $1.91\% \sim 4.03\%$ NaCl_{eqv} ,主要集中在 $2.4\% \sim 3.7\%$ NaCl_{eqv} 。

表 4 八分场银矿床流体包裹体测温结果

Table 4 Microthermometric data of fluid inclusions in the Bafenchang silver deposit

类型	个数	直径 (μm)	气相分数 (%)	冰点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	完全均一 温度($^{\circ}\text{C}$)	盐度 (% NaCl_{eqv})	密度(g/cm^3)	捕获压力 峰值/MPa	深度/km
I 型	87	5 ~ 12	20 ~ 40	-2.6 ~ -0.9	172 ~ 232	1.57 ~ 4.34	0.85 ~ 0.92	9.9 ~ 22.6	1.0 ~ 2.3
II 型	20	2 ~ 6	50 ~ 70	-2.4 ~ -1.1	185 ~ 245	1.91 ~ 4.03	0.82 ~ 0.91		

注:测试单位:廊坊市地智科技有限公司;测试时间:2021 年 3 月。

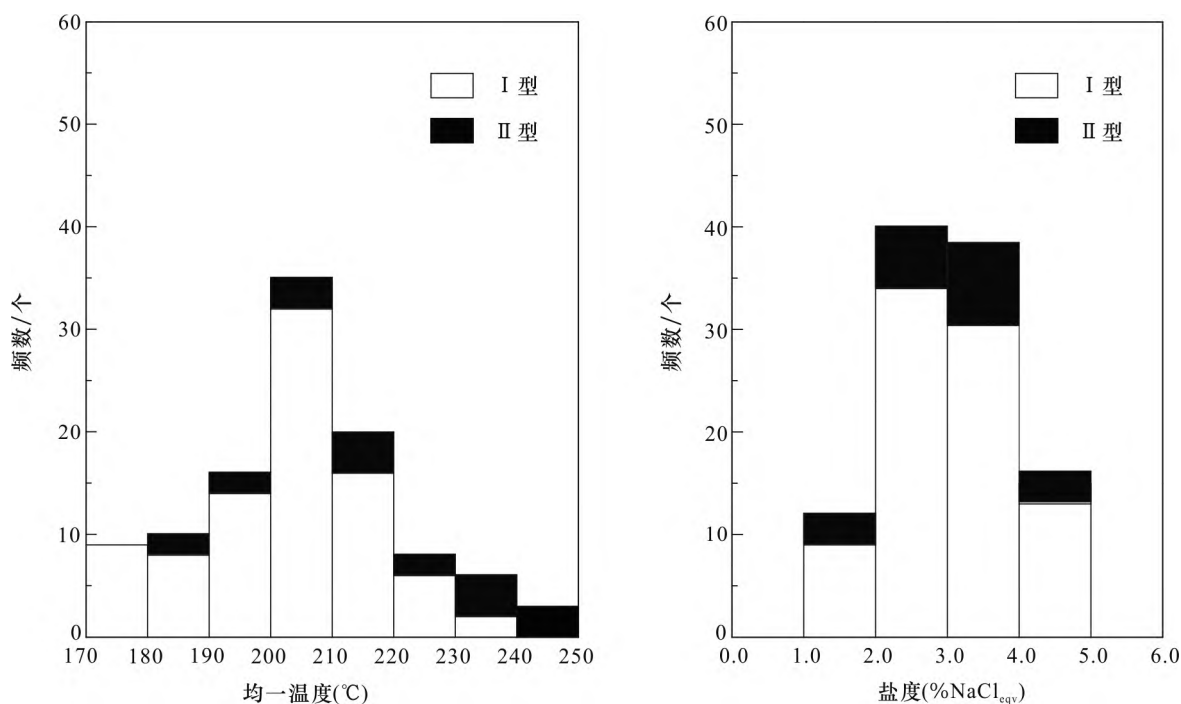


图 6 八分场银矿床包裹体均一温度 - 盐度直方图

Fig. 6 Histograms of homogeneous temperature and salinity of fluid inclusions in the Bafenchang silver deposit

包裹体密度变化于 $0.82 \sim 0.92 \text{ g}/\text{cm}^3$, 平均 $0.88 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。密度整体变化较小, 其中 I 型包裹体密度变化于 $0.85 \sim 0.92 \text{ g}/\text{cm}^3$, II 型包裹体密度变化于 $0.82 \sim 0.91 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

估算流体捕获压力结果为 $7.9 \sim 35.6 \text{ MPa}$, 峰值主要集中在 $9.9 \sim 22.6 \text{ MPa}$ 。估算其成矿深度为 $1.0 \sim 2.3 \text{ km}$, 推测矿床最初可能形成于地下 2.3 km 。

总体上, 八分场银矿床主成矿阶段的包裹体显示出中低温、低盐度、低密度和低压的特征。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

氢氧同位素被认为是提供成矿流体来源信息的潜在示踪物 (Ohmoto, 1986; Calagari, 2003; Simmons and Brown, 2007; 薛玉山等, 2022), 本次氢氧同位素的测试结果见表 5。可以看出, 八分场银矿床石英

的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}} = 12.45\text{‰} \sim 13.11\text{‰}$, 极差 0.66‰ , 平均值 12.89‰ 。 $\delta\text{D}_{\text{流体}} = -110.8\text{‰} \sim -89.1\text{‰}$, 极差 21.7‰ , 平均值 -99.6‰ 。通过石英 - 水氧同位素温度计算方程 $10^3 \ln \alpha_{(\text{石英}-\text{水})} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ (Clayton et al., 1972) (T 为氧同位素平衡温度, 单位为 K), 关系式中的温度取流体包裹体测定的均一温度平均值 $208 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 计算获得流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}} = 1.3\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$, 极差 0.6‰ , 平均值 1.7‰ 。

在氢氧同位素图解中, 样品主要落于大气降水和岩浆水之间, 明显偏向岩浆水, 远离大气降水 (图 7)。表明八分场银矿床的成矿流体是由岩浆水为主导, 同时混入了一定量的大气降水, 围岩和大气降水的水 - 岩化学反应 (Taylor, 1986; Mernagh et al., 2007; 韩龙等, 2017; 赵忠海等, 2021; 袁硕浦等, 2022) 导致了成矿流体氧同位素向岩浆水方向发生偏移。和区域上其他矿床主成矿阶段流体不同的是 (吕军等, 2009; 袁茂文, 2020; 赵忠海等, 2021),

表 5 多宝山区金矿床石英氢氧同位素组成表
Table 5 D-O isotope components of quartz from the Au-Ag deposits in Duobaoshan area

矿区	主成矿期	样品编号	测试矿物	温度/℃	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{流体}}/\text{‰}$	数据来源
八分场银矿床	石英-银-多金属硫化物阶段	W001	石英	208	12.45	1.3	-110.8	本文
		W002		208	13.11	1.9	-89.1	
		W003		208	12.92	1.7	-91.9	
		W004		208	12.89	1.7	-107.1	
		W005		208	13.10	1.9	-102.2	
		W006		208	12.86	1.7	-103.9	
二道坎银矿床	沥青-银-硫化物-石英阶段	ZK284-2-1	石英	142	13.40	-2.8	-113.2	袁茂文,2020
		ZK284-2-2		142	9.90	-6.3	-119.1	
		ZK332-S		142	15.26	-1.0	-109.7	
		ZK272-2-26		142	14.42	-1.8	-110.6	
		ZK272-4-4		142	14.87	-1.3	-111	
		ZK344-2-1		142	14.30	-1.9	-112.7	
永新金矿床	石英-多金属硫化物-自然金阶段	ZK272-2-1	石英	142	16.63	0.4	-113.1	赵忠海等,2021
		TC165-25-1		217	7.6	-2.7	-102.1	
		TC165-25-2		217	6.9	-3.8	-107.4	
		ZK14-5-34-2		217	7.8	-2.9	-121.7	
		ZK14-5-34-b		217	7.8	-2.9	-116.4	
		185-3YX-2		217	8.3	-2.4	-105.8	
		175-11YX-5		217	5.4	-5.3	-123.5	
		180-17YX-1		217	7.1	-3.6	-124.8	
		175-12YX-2		217	6.7	-4.0	-124.8	
		E170TC19-1		217	5	-5.7	-110.8	
E170TC19-2	217	5.3	-5.4	-121				
E170TC19-3	217	6.4	-4.3	-120.8				
E170TC19-4	217	8.4	-2.3	-118.3				
三道湾子金矿床	石英-金-多金属阶段	TZ11	石英	181	-2.3	-15.3	-110	吕军等,2009
		TZ12		232	-2	-11.8	-107	
		TZ13		206	-1.8	-13.1	-97	
		TZ14		262	-0.2	-8.6	-86	
		TZ15		264	-1.8	-10.1	-94	
		TZ19		267	-1.7	-9.9	-89	
		TZ20		262	-1.9	-10.3	-92	

注:测试单位:北京科荟测试技术有限公司;测试时间:2021年6月。

八分场银矿床成矿流体具有更高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,说明相较于其他矿床其成矿流体具有更高的温度,与围岩发生了更充分的氧同位素交换(Calagari,2003;车合伟等,2016;韩龙等,2017)。八分场银矿床成矿流体偏低的 δD 值与区域上其他矿床一致,流体中氢同位素较低,整体处在岩浆水下部分区域,造成成矿流体较低 δD 值的主要原因,一般研究认为主要是成

矿流体与周围大气中的还原性气体发生了氢同位素交换而引起(Calagari,2003;吕军等,2009;邓轲等,2013;车合伟等,2016)。可以肯定,至少有大气降水的加入导致了八分场银矿床成矿流体中氢同位素的亏损,也不排除有其他类型水的参与。八分场银矿床的流体包裹体表现出低盐度和低密度的特征,也印证了以上观点。

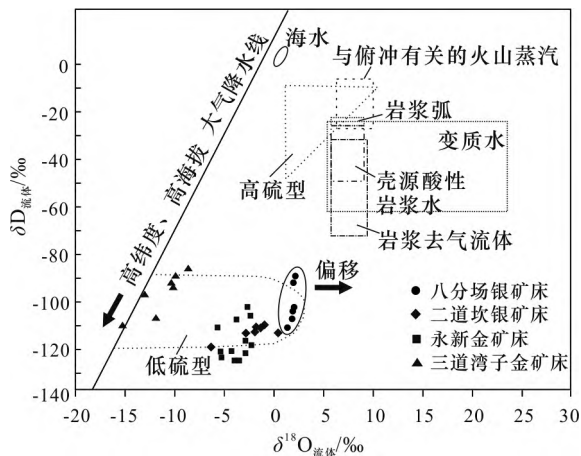


图7 八分场银矿床成矿流体 $\delta D - \delta^{18}O$ 图解 (底图据 Hedenquist et al., 1994) (数据来源: 吕军等, 2009; 袁茂文, 2020; 赵忠海等, 2021)

Fig. 7 $\delta D - \delta^{18}O$ plot of ore fluids from the Bafenchang silver deposit (base map from Hedenquist et al., 1994) (data source: Lü et al., 2009; Yuan, 2020; Zhao et al., 2021)

综上所述,八分场银矿床成矿流体为岩浆水和大气降水的混合,由岩浆水主导。

5.2 矿床成因

区域上的二道坎银矿床具有浅成低温热液型矿

床的成矿特征(袁茂文, 2020; Deng et al., 2021),八分场银矿床相较于二道坎银矿床(表6),二者在矿体特征、矿石与脉石矿物组合和银的赋存状态等方面有一定的相似性,但在与成矿有关的岩浆岩、成矿流体、氢氧同位素等特征上却有着显著的差异。矿床地质研究显示,八分场银矿体赋存在 NNE 向张性断裂带内,赋矿岩石为构造角砾岩,矿床内暂未发现典型浅成低温热液型矿床中与成矿密切相关的火山岩-次火山岩。流体包裹体中仅发育气液两相包裹体,均一温度集中在 190 ~ 220 °C,明显高于二道坎银矿床(120 ~ 160 °C)。其成矿流体的 $\delta^{18}O$ 值在 1.3‰ ~ 1.9‰,也明显大于二道坎银矿床(-6.3‰ ~ 0.4‰),说明八分场银矿床的成矿流体具有更高的温度,与围岩发生了更充分的氧同位素交换,其成矿作用更强烈,成矿流体是由岩浆水主导。流体中未发现有机质,表明其矿物质沉淀与天然沥青等有机质参与下的化学作用无关。八分场银矿流体包裹体类型单一,未发现高盐度含子晶包裹体和流体包裹体沸腾现象,说明流体沸腾不是矿物质沉淀的主控因素(Richards, 2009; 韩龙等, 2017; 黄瀚霄等, 2019),导致矿物质沉淀的主要机制可能是流体的混合作用。

表6 八分场银矿床与二道坎银矿床对比表

Table 6 Comparison between the Bafenchang silver deposit and Erdaokan silver deposit

对比项目	八分场银矿床	二道坎银矿床
矿体特征	含矿岩石主要为构造角砾岩,少量含矿石英脉。赋存围岩为腰桑南组沉积变质地层,矿体呈脉状,受 NNE 向断裂控制	含矿岩石为热液角砾岩,赋存围岩为泥砾河组沉积变质地层,矿体呈脉状,受 NW 向断裂控制
矿石和脉石矿物组合	矿石矿物主要为多金属硫化物(磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、黝铜矿、黄铜矿)等;脉石矿物主要为石英、方解石和绢云母,其次为绿泥石和绿帘石	矿石矿物主要为多金属硫化物(磁铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、深红银矿、辉银矿、黝铜矿等);脉石矿物主要为石英、方解石和绢云母
与成矿有关的岩浆岩	暂未发现与成矿密切相关的火山岩-次火山岩	银矿体与火山岩及闪长玢岩类密切相关
成矿阶段	早期石英-磁铁矿阶段;成矿前期石英-黄铁矿阶段;主成矿期石英-银-多金属硫化物阶段;晚期碳酸盐-石英-少硫化物阶段	早期黄铁矿-磁铁矿-石英阶段;主成矿期沥青-银-硫化物-石英阶段;晚期碳酸盐阶段
赋存状态	以包裹银为主(多金属硫化物、石英和硅酸盐);独立银矿物(辉银矿)	以独立银矿物(辉银矿、深红银矿)和不可见银(多金属硫化物包裹)
流体包裹体类型	富液相包裹体、富气相包裹体	纯液相包裹体、纯气相包裹体、富液相包裹体、富气相包裹体
主成矿阶段流体特征	均一温度:190 ~ 220 °C;盐度:1.9% ~ 4.1% NaCl _{eqv} ;密度:0.82 ~ 0.92 g/cm ³	均一温度:120 ~ 160 °C;盐度:0.5% ~ 4.5% NaCl _{eqv} ;密度:0.89 ~ 1.1 g/cm ³
氢氧同位特征	流体 $\delta^{18}O$ 在 1.3‰ ~ 1.9‰ 之间; δD 在 -110.8‰ ~ -89.1‰ 之间;成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特点,以岩浆分异流体为主	流体 $\delta^{18}O$ 在 -6.3‰ ~ 0.4‰ 之间; δD 在 -119.1‰ ~ -109.7‰ 之间;成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特点
成矿时代	暂未开展相关研究	232.9 ± 2.3 Ma ~ 234.9 ± 1.4 Ma
矿床类型	中低温热液型	浅成低温热液型

续表 6

Continued Table 6

对比项目	八分场银矿床	二道坎银矿床
其他特征	成矿深度:1.0~2.3 km;无有机质	成矿深度:<1 km;成矿流体中含天然沥青,与含银多金属硫化物密切共生,是矿致沉淀的主要原因;与成矿有关的闪长玢岩类为 234.2±2.8 Ma
数据来源	本文	袁茂文,2020;Deng et al.,2021

综合八分场银矿床地质特征与成矿流体包裹体的研究成果,笔者认为八分场银矿应属中低温热液型矿床。晚古生代-中生代,区域上经历了古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲和闭合,以及古太平洋板块向西俯冲作用的影响,发生了大规模的岩浆作用和火山热液活动,为成矿提供了热动力来源。期间形成的大量韧性走滑断裂错断早期的地层,为容矿提供了有利的空间场所。在热动力作用下,初始岩浆原生流体沿 NNE 向张性断裂向地表运移,上升到浅部的过程中,逐渐与围岩中代表大气降水的流体混合,并与围岩反应并不断萃取围岩中的成矿元素形成高度矿化的成矿流体。由于大气降水的加入,导致流体盐度和温度等急剧降低,不同流体的混合导致盐度等物理化学条件的变化可能是银多金属沉淀的主要原因,最终在 NNE 向张性裂隙中沉淀成矿。

5.3 指示意义

多宝山地区位于兴安地块与松嫩地块的拼合带附近,自古生代以来,受古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋 3 大构造域的影响,区域上发生了强烈的构造-岩浆活动,形成了我国重要的铜、钼、金成矿区。八分场银矿床和二道坎银矿床的发现填补了该地区银矿床的找矿空白,二者的地理位置十分相近,直线距离约 15 km(图 1c),具有相同的大地构造位置。本文研究表明,二者都为热液成因,成矿流体均具有岩浆水和大气降水混合的特点,不同的是八分场银矿床成矿流体温度高且为深部岩浆水主导,其不同于二道坎银矿和区域上热液型金矿床埋藏浅且成矿流体由大气降水为主导的特点(吕军等,2009;邓轲等,2013;车合伟等,2016;赵忠海等,2021)。暗示出多宝山地区热液型金银成矿作用不仅发生在地表浅处,深部仍具有较大的找矿潜力,同时也证明了多宝山北西向弧形构造带上具有很大的找矿空间。八分场银矿床深部可能存在隐伏的与其成矿同期同源的火山岩-次火山岩体,其与二道坎银矿床极有可能形成一条北西向的构造成矿体系,表明多宝山铜、钼、金矿集区已经具备成为铜、钼、

金、银矿集区的潜力。八分场银矿床的发现和未来成矿模式的研究,将对区域岩浆热液矿床的找矿工作和成矿规律的研究起到重要的指示意义。

6 结论

(1)八分场银矿床主要经历了四个阶段的成矿过程:早期石英-磁铁矿阶段;成矿前期石英-黄铁矿阶段;主成矿期石英-银-多金属硫化物阶段;晚期碳酸盐-石英-少硫化物阶段。

(2)八分场银矿床主成矿阶段流体包裹体仅含气液两相包裹体。包裹体均一温度峰值集中于 190~220 °C,盐度集中于 1.9%~4.1% NaCl_{eqv},密度变化于 0.82~0.92 g/cm³。流体成矿压力峰值集中在 9.9~22.6 MPa,估算成矿深度为 1.0~2.3 km。八分场银矿床的成矿流体具有中低温、低盐度、低密度和低压的特征。

(3)氢氧同位素研究表明,流体 δ¹⁸O 变化范围在 1.3‰~1.9‰之间,δD 变化范围在 -110.8‰~-89.1‰之间,成矿流体为岩浆水和大气降水的混合,由岩浆水主导。

(4)矿床地质、流体包裹体和氢氧同位素的特征表明,八分场银矿床为受构造控制的中低温热液型银矿床。

致谢:野外地质工作得到黑龙江省黑河市金水农场八分场 530.8 高地金银多金属矿普查项目组成员大力的支持与帮助。在成文过程中得到中国地质大学(武汉)韩金生教授的耐心指导,审稿老师对论文提出的修改意见助益良多,在此一并表示衷心的感谢!

[References]

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O - NaCl solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3):683-684.
- Brown P E. 1989. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. *American Mineralogist*, 74(11-12):1390-1393.
- Calagari A A. 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit

- at Sungun, East Azarbaijan, Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21 (7): 767 – 780.
- Che Hwei, Zhou Zhenhua, Ma Xinghua, Ouyang Hegen, Liu Jun. 2016. Tentative discussion on genesis of Zhengguang Au deposit in northern Da Hinggan Mountains: Constrained by fluid inclusions and stable isotope composition [J]. *Mineral Deposits*, 35 (3): 539 – 558 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 77 (17): 3057 – 3067.
- Deng C Z, Li C L, Rong Y M, Chen D, Zhou T, Wang X Y, Chen H Y, Lehmann B, Yin R S. 2021. Different metal sources in the evolution of an epithermal ore system: Evidence from mercury isotopes associated with the Erdaokan epithermal Ag – Pb – Zn deposit, NE China [J]. *Gondwana Research*, 95: 1 – 9.
- Deng Ke, Li Nuo, Yang Yongfei, Zhang Cheng, Yu Yuanbang, Zhang Dongcai. 2013. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhengguang gold deposit, Heihe City, Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (1): 231 – 240 (in Chinese with English abstract).
- Gao S, Xu H, Zang Y Q, Yang L J, Yang B, Wang T. 2016. Late Mesozoic magmatism and metallogeny in NE China: The Sandaowanzi – Beidaogou example [J]. *International Geology Review*, 59 (11): 1413 – 1438.
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl – KCl – H₂O solutions [J]. *Economic Geology*, 83 (1): 197 – 202.
- Han Long, Jiang Yingjiu. 2017. Fluid inclusions and genetic type of the Yanweishan Cu – Ag deposit in the northern Great Xing'an Range [J]. *Geology and Exploration*, 53 (3): 445 – 455 (in Chinese with English abstract).
- Hedenquist J W, Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 370: 519 – 527.
- Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226 (1): 73 – 100.
- Li Chenglu. 2018. Gold metallogeny and prospecting in the Nenjiang – Heihe tectonic mélange zone, Heilongjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1 – 273 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Xu W L, Wang F, Pei F P, Tang J, Zhao S. 2017. Triassic volcanism along the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial – temporal extent of the Mongol – Okhotsk tectonic regime [J]. *Gondwana Research*, 48: 205 – 223.
- Liu Baoshan, Cheng Zhaoxun, Qian Cheng, Zhang Chunpeng, Zhong Hui, Han Renping. 2021. Geochronology and geodynamic background study of the Late Triassic bimodal pattern intrusive rock in Da Hinggan Mountains Duobaoshan area [J]. *Earth Science*, 46 (7): 2311 – 2328 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Duan Guangxian. 1987. The density and isochoric formulae for NaCl – H₂O fluid inclusion and their application [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7 (4): 59 – 66 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Wu G, Li Y, Zhu M T, Zhong W. 2012. Re – Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 300 – 312.
- Liu Yang, Cheng Xuezhao, Wang Xichen, Liu Jinying, Wang Lin, Wang Xunlian. 2008. Cu – source and enrichment laws of the Duobaoshan porphyry copper deposit in Heilongjiang Province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 43 (4): 671 – 684 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, Wen Q B, Neubauer F, Liang C Y. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 43: 123 – 148.
- Lü Jun, Zhao Zhidan, Cao Yaping, Han Zhenzhe, Zhang Aikui, Yu Junchuan. 2009. Geological characteristics and genesis of the Shandaowanzi gold deposit in Heilongjiang Province [J]. *Geology in China*, 36 (4): 853 – 860 (in Chinese with English abstract).
- Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, Wygralak A S, Wyborn L A I. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion – related gold systems [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (1): 21 – 32.
- Norman D I, Musgrave J A. 1994. N₂ – Ar – He compositions in fluid inclusions; Indicators of fluid source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (3): 1119 – 1131.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16 (1): 491 – 559.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu – Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction – modified lithosphere [J]. *Geology*, 37 (3): 247 – 250.
- Shao Jieliang. 1988. *Prospecting mineralogy of gold ore* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press: 1 – 158 (in Chinese).
- Simmons S F, Brown K L. 2007. The flux of gold and related metals through a volcanic arc, Taupo Volcanic Zone, New Zealand [J]. *Geology*, 35 (12): 1099 – 1102.
- Sun Fengyue, Jin Wei, Li Bile. 2000. Considerations on the mineralizing depth of hydrothermal lode gold deposit [J]. *Journal of Changchun University of Science*, 30 (5): 27 – 29 (in Chinese with English abstract).
- Sun J G, Zhang Y, Han S J, Men L J, Li Y X, Chai P, Yang F. 2013. Timing of formation and geological setting of low – sulphidation epithermal gold deposits in the continental margin of NE China [J]. *International Geology Review*, 55 (5): 608 – 632.
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16 (1): 185 – 225.
- Tong Kuangyin, Yang Yanchen, Song Guoxue, Liang Haijun, Ma Longfei. 2015. Geological characteristics genesis and prospecting of the Zhengguang Au – Zn deposit in Heilongjiang Province [J]. *Geology and Exploration*, 58 (5): 940 – 953 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Wang Guorui, Liu Jun, Zhou Zhenhua, Li Tiegang, Wu Hao. 2014. Metallogenic series and ore – forming pedigree of main ore deposits in northern Great Xing'an Range [J]. *Mineral Deposits*, 33 (6): 1127 – 1150 (in Chinese with English abstract).

- Wu Rigen, Li Xinpeng, Zhuang Qian, Liu Hongda, Shi Guoming. 2021. Geological characteristics and prospecting indicators in Bafenchang silver polymetallic deposit, Heihe City, Heilongjiang Province [J]. *Gold*, 42(8): 27–31 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014. Preliminary study on the Pre – Mesozoic tectonic unit division of the Xing – Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841–1857 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yushan, Men Wenhui, Liu Xinwei. 2022. Fluid inclusions and C – H – O isotope characteristics of the Xianggou – Sigou tungsten deposit, Shanyang County, south Qinling [J]. *Geology and Exploration*, 58(5): 940–953 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Maowen. 2020. The contribution of the bitumen to the mineralization of the non – stratabound metal deposit: Ag – Pb – Zn deposits in the Great Xing'an Range [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1–123 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Shuopu, Wang Jianping, Xu Zhan, Wang Jichun, Lü Zhao, Yang Zhuang. 2022. Characteristics of fluid inclusions and C – H – O – S stable isotopes in the Bainaimiao gold deposit, Inner Mongolia and their implications for the deposit genesis [J]. *Geology and Exploration*, 58(2): 286–298 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction – induced delamination [J]. *Chemical Geology*, 276(3): 144–165.
- Zhao Yiming, Bi Chengsi, Zou Xiaoqi, Sun Yali, Du Andao, Zhao Yuming. 1997. The Re – Os isotope age of molybdenite from Duobaoshan and Tongshan porphyry copper (molybdenum) deposits [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(1): 61–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Wang Jiangpeng, Zhao Guangjiang, Cui Yubin. 2011. Metallogenic regularity and prospecting direction of Duobaoshan ore field, Heilongjiang Province, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1676–1688 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhonghai, Chen Jun, Qiao Kai, Cui Xiaomeng, Sun Jingui, Li Chenglu, Yang Yu. 2021. Ore – fluid sources and genesis of Yongxin gold deposit in northwestern Xiao Hinggan Mountains: Constraint from fluid inclusions and H – O – S – Pb isotopes [J]. *Mineral Deposits*, 40(2): 221–240 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Zeng Weishun, Cao Jialin, Han Jie, Guo Xiaodan. 2012. The tectonic framework and evolution of the NE China: From ~ 500Ma to ~ 180Ma [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1298–1329 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Mao J W, Ma X H, Che H W, Ou'yang H G, Gao X. 2017. Geochronological framework of the Early Paleozoic Bainaimiao Cu – Mo – Au deposit, NE China, and its tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 323–338.
- [附中文参考文献]
- 车合伟, 周振华, 马星华, 欧阳荷根, 刘军. 2016. 大兴安岭北段争光金矿床成因探讨: 来自流体包裹体及稳定同位素的制约 [J]. *矿床地质*, 35(3): 539–558.
- 邓轲, 李诺, 杨永飞, 张成, 于援帮, 张东财. 2013. 黑龙江省黑河市争光金矿流体包裹体研究及矿床成因 [J]. *岩石学报*, 29(1): 231–240.
- 韩龙, 姜迎久. 2017. 大兴安岭北段偃尾山铜银矿床流体包裹体与矿床成因类型研究 [J]. *地质与勘探*, 53(3): 445–455.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘洪, 张洪铭, 张林奎, 余槐, 焦彦杰, 陈小平, 梁维. 2019. 西藏冈底斯成矿带西段罗布真浅成低温热液型金多金属矿床地质特征及发现意义 [J]. *矿床地质*, 38(5): 1117–1128.
- 李成禄. 2018. 黑龙江省嫩江 – 黑河构造混杂岩带金矿成矿作用及找矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京): 1–273.
- 刘宝山, 程招助, 钱程, 张春鹏, 钟辉, 韩仁萍. 2021. 大兴安岭多宝山晚三叠世双峰式侵入岩年代学及地球动力学背景 [J]. *地球科学*, 46(7): 2311–2328.
- 刘斌, 段光贤. 1987. NaCl – H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用 [J]. *矿物学报*, 7(4): 59–66.
- 刘扬, 程学展, 王喜臣, 刘金英, 王琳, 王训练. 2008. 黑龙江多宝山斑岩铜矿的铜金属来源与富集规律 [J]. *地质科学*, 43(4): 671–684.
- 吕军, 赵志丹, 曹亚平, 韩振哲, 张爱奎, 于俊川. 2009. 黑龙江三道湾子金矿床地质特征及成因探讨 [J]. *中国地质*, 36(4): 853–860.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1–158.
- 孙丰月, 金巍, 李碧乐. 2000. 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*, 30(S): 27–29.
- 佟匡胤, 杨言辰, 宋国学, 梁海军, 马龙飞. 2015. 黑龙江争光金矿床地质特征、矿床成因及找矿潜力探讨 [J]. *地质与勘探*, 51(3): 507–518.
- 武广, 王国瑞, 刘军, 周振华, 李铁刚, 吴昊. 2014. 大兴安岭北部主要金属矿床成矿系列和区域成矿谱系 [J]. *矿床地质*, 33(6): 1127–1150.
- 乌日根, 李新鹏, 庄倩, 刘洪大, 石国明. 2021. 黑龙江省黑河市八分场银多金属矿床地质特征及找矿标志 [J]. *黄金*, 42(8): 27–31.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 周永恒, 王炎阳, 罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探 [J]. *岩石学报*, 30(7): 1841–1857.
- 薛玉山, 门文辉, 刘新伟. 2022. 南秦岭山阳县香沟 – 寺沟钨矿流体包裹体及 C – H – O 同位素特征 [J]. *地质与勘探*, 58(5): 940–953.
- 袁茂文. 2020. 天然沥青与非层控金属成矿关系研究: 以二道坎银铅锌矿床为例 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京): 1–123.
- 袁硕浦, 王建平, 许展, 王继春, 吕钊, 杨壮. 2022. 内蒙古白乃庙金矿流体包裹体与 C – H – O – S 稳定同位素特征及其对矿床成因的启示 [J]. *地质与勘探*, 58(2): 286–298.
- 赵一鸣, 毕承思, 邹晓秋, 孙亚莉, 杜安道, 赵玉明. 1997. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜 (钼) 矿床中辉钼矿的铷 – 钷同位素年龄 [J]. *地球学报*, 27(1): 61–67.
- 赵元艺, 王江朋, 赵广江, 崔玉斌. 2011. 黑龙江多宝山矿集区成矿规律与找矿方向 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 41(6): 1676–1688.
- 赵忠海, 陈俊, 乔锴, 崔晓梦, 孙景贵, 李成禄, 杨逾. 2021. 小兴安岭西北部新金矿床成矿流体来源与矿床成因: 流体包裹体和 H –

O-S-Pb 同位素证据[J]. 矿床地质, 40(2): 221-240.
周建波, 曾维顺, 曹嘉麟, 韩杰, 郭晓丹. 2012. 中国东北地区的构造格

局与演化: 从 500 Ma 到 180 Ma[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1298-1329.

Discovery of the Bafenchang Silver Deposit and Its Ore-forming Fluids Characteristics in the Northern Great Xing'an Range

WU Rigen¹, ZHUANG Qian¹, ZHANG Shuang², LI Xinpeng¹, DENG Changzhou³

(1. Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150036; 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081)

Abstract: The Duobaoshan area, located in the northern part of the Great Xing'an Range, is an important Cu-Mo-Au metallogenic area. The discoveries of the Erdaokan and Bafenchang silver deposits in recent years indicate that there is a great prospecting potential for silver in this area. Most of the studies have been focused on Cu-Mo-Au, whereas the knowledge of silver deposits is not in depth. The newly discovered Bafenchang silver deposit provides an opportunity to study the silver mineralization in this area. Based on the detailed geological characteristics, we have studied the fluid characteristics of the Bafenchang silver deposit. A detailed comparison with the Erdaokan silver deposit has also been conducted to provide reference for regional ore prospecting and improving metallogenic theory. The ore bodies of Bafenchang silver deposit are hosted in structural breccia in the form of veins, which are controlled by the NNE-trending faults. The formation of the deposit was mainly involved in the following four stages: quartz-magnetite stage, quartz-pyrite stage, quartz-silver-polymetallic sulfide stage and carbonate-quartz-les sulfide stage. The study of fluid inclusions in quartz from the main ore-forming stage shows that the fluid inclusions are mainly gas-liquid two-phase inclusions. The peak homogenization temperature of the inclusions varies from 190 °C to 220 °C, the salinity ranges from 1.9% to 4.1% NaCl_{eq}, and the density varies from 0.82 g/cm³ to 0.92 g/cm³. The metallogenic pressure of the ore-forming fluid is at the range of 9.9 and 22.6 MPa, and the estimated metallogenic depth is 1.0~2.3 km. The variation range of fluid δ¹⁸O is 1.3‰~1.9‰, and δD is -110.8‰~-89.1‰. In general, the ore-forming fluid has shown medium-low temperature, low salinity, low density as well as low pressure, with similarity to the newly discovered Erdaokan silver deposit in the region. The ore-forming fluids should be sourced from a mixture of magmatic water and atmospheric water for both Bafenchang and Erdaokan. The difference is that the ore-forming fluids from the Bafenchang silver deposit are primarily composed of magmatic water and have been formed at a greater depth. It is inferred that the Duobaoshan area has a great silver metallogenic potential, which could be exemplified by silver mineralization occurring both in the shallow surface (represented by Erdaokan silver deposit) and in deeper depth (represented by Bafenchang silver deposit).

Key words: fluid inclusion, ore-forming fluid, hydrogen and oxygen isotopes, ore deposit geology, Bafenchang silver deposit, Great Xing'an Range

