

延边闹枝铜金矿床的矿物流体包裹体特征 与成矿作用研究*

门兰静, 孙景贵** 陈冬, 陈雷, 梁树能, 逢伟, 常艳, 张朋, 聂喜涛
(吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要 闹枝铜金矿床是延边内生金铜矿集区内的典型矿床之一, 矿体主要为含金黄铜矿黄铁矿石英脉型。笔者运用显微测温、激光拉曼探针, 对其矿物内的流体包裹体进行了系统研究。实验结果表明: ① 流体包裹体的类型主要为气液两相包裹体, 其次为纯气相、富气相包裹体及纯液相包裹体, 还有少量含子晶的多相包裹体; ② 流体包裹体的均一温度为 150~410℃, 与黄铁绢英岩、石英-黄铁矿、石英-多金属硫化物及石英方解石脉 4 个矿化蚀变阶段相对应的流体包裹体的均一温度分别为 350~410℃、290~350℃、210~290℃、150~210℃; ③ 流体包裹体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.74%~20.97%, I、II、III、IV 矿化阶段成矿流体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 分别为 2.396%~5.548%、2.24%~8.68%、1.74%~20.97% 和 6.3%; ④ 流体包裹体的气体成分主要为 H_2O 和 CO_2 。结合前人的研究成果, 笔者进一步确定该矿床的成矿流体具有深源岩浆热流体性质, 在流体上升过程中曾发生过弱的沸腾作用, 并在硫化物石英脉、多金属硫化物石英脉、方铅矿脉以及石英方解石脉形成过程中, 伴有少量地下水或大气水的加入。

关键词 地球化学 流体包裹体 流体演化 成矿作用 闹枝铜金矿床 延边地区

中图分类号: P618.41; P618.51

文献标志码: A

Characteristics of fluid inclusions and mineralization in Naozhi copper-gold deposit, Yanbian area

MEN LanJing, SUN JingGui, CHEN Dong, CHEN Lei, LIANG ShuNeng, PANG Wei,
CHANG Yan, ZHANG Peng and NIE XiTao
(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract

The Naozhi Au-Cu deposit is a typical endogenic deposit in Yanbian and consists mainly of quartz vein-auriferous ore bodies. The fluid phases associated with auriferous quartz veins were investigated using microthermometry and Raman microprobe. Some conclusions have been reached through petrographic observation: ① there are mainly gas-liquid biphasic (L + V) inclusions, subordinately pure volatile (V), volatile-rich (RV) and pure liquid inclusions (L), and minor daughter minerals-bearing polyphase inclusions (L + V + S); ② homogenization temperatures of fluid inclusions range from 150 °C to 410°C, and the homogenization temperatures of four successive ore-forming stages characterized respectively by pyritization-sericitization-silification (stage I), quartz-pyrite (stage II), quartz-polymetallic sulfides (stage III), and quartz-calcite (stage IV) are 350~410°C, 290~350°C, 210~290°C, and 150~210°C respectively; ③ the salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of these fluid inclusions vary between 1.74% to 20.97%, and the salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of I, II, III, IV ore-forming stages are 2.396%~5.548%, 2.24%~8.68%, 1.74%~20.97% and 6.3%, respectively; ④ the

* 本文得到国家自然科学基金(批准号:40472050;40772052)、南京大学内生金属成矿机制国家重点实验室基金(2006-2005,2006-2008,2008-2010)资助

第一作者简介 门兰静,女,1982年生,在读博士生,矿床地球化学专业。Email:menjinglan4668872@126.com

**通讯作者 孙景贵,男,1961年生,博士,教授,主要从事岩浆、热液矿床的研究。Email:sunjinggui@jlu.edu.cn

收稿日期 2009-03-09;改回日期 2009-10-15。许德焕编辑。

volatiles are mainly composed of H_2O and CO_2 . Combined with previous researches on Naozhi deposit fluid inclusions, the authors have further confirmed that the ore-forming fluids from the upper-mantle or lower-crust boiled slightly during their upward migration to the earth's surface, that sulfide quartz veins, polymetallic sulfides-rich quartz veins and galena veins were formed successively with the evolution of the ore fluids, with the participation of a bit of groundwater or meteoric water, and that the formation of quartz and calcite veins meant the end of the ore-forming process.

Key words: geochemistry, fluid inclusion, fluid evolution, mineralization, Naozhi copper-gold deposit, Yanbian area

闹枝铜金矿床是延边地区内生金铜矿集区内典型的浅成中温热液铜金矿床之一(刘文达等,1984a;1984b;刘大瞻等,1987;宋贵,1984;陈仁义等,1993;金顿镐,1987;赵源成,1987)。该矿床自20世纪70年代发现以来,曾有学者对其矿床成因进行过研究和讨论,将其作为斑岩型矿床(孟庆丽等,2001;芮宗瑶等,1995;冯守忠,1994)或浅成中温岩浆热液矿床(苏凤霞等,2003;黄圭成,1997)来构建该区斑岩-浅成低温热液金铜矿床的成矿模式,从而反映其成矿规律。笔者近期对该矿床进行了实地考察,发现该矿床并不具备典型斑岩型铜金矿床的特征,而更接近于浅成中温岩浆热液石英脉型铜金矿床。因此,笔者对其进行了矿物流体包裹体的显微特征和成分研究,并运用现代成矿理论(Echavarría et al., 2006)探讨了该矿床成矿流体的起源、演化及成矿机制,以期为揭示该矿床的成因提供科学依据。

1 成矿地质背景和矿床地质特征

闹枝铜金矿床位于吉林省延边自治州汪清县百草沟镇南20 km处,地处中国东北部陆缘、兴蒙造山带的东端,是一个历经兴蒙、印支、燕山以及喜马拉雅造山运动的复合构造区。区内出露的地层有下古生界青龙村群和五道沟群,以及中生界屯田营组和金沟岭组火山岩、次火山岩,出露的侵入岩主要为海西期花岗闪长岩和燕山期次安山岩,发育有近EW向的中深层次的韧性变形带,以及叠加其上的EW向、NS向、NW向、NE向断裂构造。

该矿床是20世纪70年代发现的中型矿床。目前,该矿区内已发现9条含金性较好的矿化蚀变带(图1),其中,以10号和9号矿脉最为发育(表1),主要矿化类型为多金属硫化物

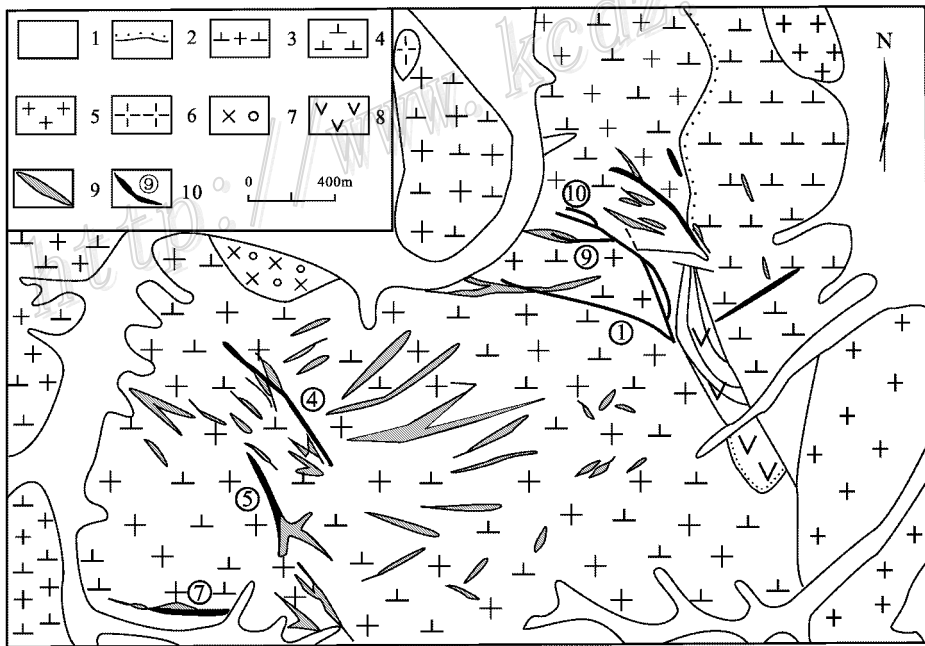


图1 闹枝铜金矿床地质简图

1—第四系;2—不整合接触;3—花岗闪长岩;4—金沟岭组火山岩;5—二长花岗岩;6—花岗闪长斑岩;
7—石英闪长岩;8—次安山岩;9—闪长玢岩;10—矿脉及编号

Fig. 1 Geological sketch map of the Naozhi copper-gold deposit

1—Quaternary; 2—Unconformity; 3—Granodiorite; 4—Volcanic rock of Jingouling Formation; 5—Monzonitic granite; 6—Granodiorite porphyry; 7—Quartz diorite; 8—Subandesite; 9—Diorite porphyrite; 10—Ore-vein and its serial number

表 1 闹枝铜金矿床 10 号脉及 9 号脉矿体的特征
Table 1 Characteristics of ore-bodies of No. 10 and 9 veins, the Naozhi copper-gold deposit

	10 号脉	9 号脉
规模		
长	1 020 m	350 m
宽	0.8~12 m	0.4~271 m
深	大于 450 m	大于 200 m
产状		
走向	NW	EW
倾向/倾角	西段 200~235°, 倾角 50~60°; 东段 235~245°, 倾角 60~65°	倾向 180~190°, 倾角 60~70°
围岩	主要为花岗闪长岩、次安山岩及金沟岭组火山岩	花岗闪长岩
矿石矿物	主要为黄铁矿、黄铜矿, 其次为方铅矿、辉铜矿等	主要为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿, 其次为闪锌矿、黝铜矿、斑铜矿、辉铜矿
围岩蚀变	硅化、绢云母化, 少量钾长石化	绿泥石化、绿帘石化、高岭土化
结构构造	自形-半自形结构、压碎结构、溶蚀交代残余结构、他形充填结构; 条带状构造、块状构造	他形粒状结构、充填结构、固溶体溶离结构、骸晶状结构、斑杂状构造、条带状构造
矿石类型	以条带状黄铜矿石英脉型为主, 其次是团块状多硫化物脉型以及细脉浸染状硫化物蚀变岩型	细脉浸染状硫化物蚀变岩型、条带状硫化物石英脉型
容矿构造	NW 向断裂和次级断裂	NW 向断裂和次级断裂

石英脉型, 石英脉呈不规则状赋存在花岗闪长岩及次火山岩的破碎蚀变带中。蚀变类型有硅化、高岭土化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等。

根据野外脉体穿插关系等地质特征, 以及对矿石光片的鉴定和分析, 结合前人资料, 将该矿床的成矿作用划分为热液期和表生期。热液期可进一步划分为 4 个成矿阶段: 第 I 阶段, 为黄铁绢英岩阶段, 矿物共生组合为磁铁矿(残留)+石英+绢云母+黄铁矿, 黄铁矿为自形, 颗粒粗大, 颜色为亮黄色; 第 II 阶段, 为石英-黄铁矿阶段, 矿物共生组合为石英、黄铁矿、黄铜矿(图 2g)、少量方铅矿及自然金(图 2i); 第 III 阶段, 为石英-多金属硫化物阶段, 主要矿物为石英(呈烟灰色)、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿(图 2h)、黝铜矿、碲金银矿及斑铜矿、辉铜矿(图 2h)等, 是金铜的主要矿化阶段; 第 IV 阶段, 为石英方解石脉阶段, 主要形成方解石、石英和少量黄铁矿。

2 样品和实验方法

样品为采自 10 号脉 8 中段(样品号 Nz10-8)的黄铜黄铁矿石英脉(图 2d)、4 中段的多金属硫化物石英脉(样品号 Nz10-4)(图 2e)、9 号脉 4 中段的团块状黄铁矿石英脉(样品号 Nz9-4)(图 2c)、含角砾的绿泥石化黄铁矿石英脉(样品号 Nz-13-2)(图 2b、f)及方铅矿中的石英脉(样品号 Nz-13-1)(图 2a)。共完成 10 件样品的测温(均一温度、冰点和成分)工作, 以及 15 件单个流体包裹体样品的激光拉曼探针分析。

显微测温工作在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成, 所使用的仪器为 Linkamthms-600 型冷热台(-196~600℃)。测定前, 应用人造纯 H₂O 及 ω(NaCl_{eq})为 25% 的 H₂O-NaCl 包裹体(国际标样)对流体包裹体的参数进行了系统校正, 误差为 ±0.1℃。测试期间, 当温度小于 30℃ 时, 升温速率为 1℃/min; 当温度为 200℃ 以上时, 升温速率为

10℃/min, 在相变化及冰点附近, 升温速率小于 0.2℃/min。

单个流体包裹体的拉曼成分测试分别在南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验(Renishaw RM2000 型激光拉曼探针)和北京核工业地质分析测试研究中心(LABHR-VIS LABRAM HR800 型显微激光拉曼光谱仪)完成。Renishaw RM2000 型仪器的实验条件为: 514 nm Ar⁺ 激光器, 光谱计数时间为 10 s, 每 cm⁻¹ 全波段一次取峰, 激光束斑 1 μm。LabRAM HR800 型仪器的实验条件为: 波长 532 nm, Yag 晶体倍频, 固体激光器, 激光束斑 ≥1 μm, 扫描时间为 10 s, 扫描 2 次。

3 实验结果

3.1 流体包裹体的类型和特征

本次研究以 II、III 阶段矿石中石英内的流体包裹体为研究对象。首先, 将上述矿石样品制成双面抛光的包裹体光薄片(共 10 余件)。然后, 在光学显微镜下观察, 以确定不同阶段、不同类型包裹体的特点。流体包裹体薄片的岩相学观察显示: 石英内的流体包裹体(图 3)最清晰, 既有沿晶带分布或孤立散乱分布的原生包裹体, 又有沿裂隙分布的假次生、次生包裹体, 在物相学上, 除纯气相包裹体、气液相包裹体、纯液相包裹体外, 还有少量含透明子矿物及微量含金属子矿物(可能是黄铜矿)的流体包裹体。本文主要研究原生流体包裹体, 其特征分述如下。

纯气相流体包裹体(V)

主要分布在 10 号脉 4 中段和 8 中段的硫化物石英脉内。单个包裹体呈近圆形、椭圆形, 大小为 2~10 μm, 约占流体包裹体总数的 5%(图 3a、e)。其中, 直径大者, 沿石英的晶带孤立分布, 直径小者, 则成群呈带状分布在石英内部的愈合裂隙中。室温时为单一气相。

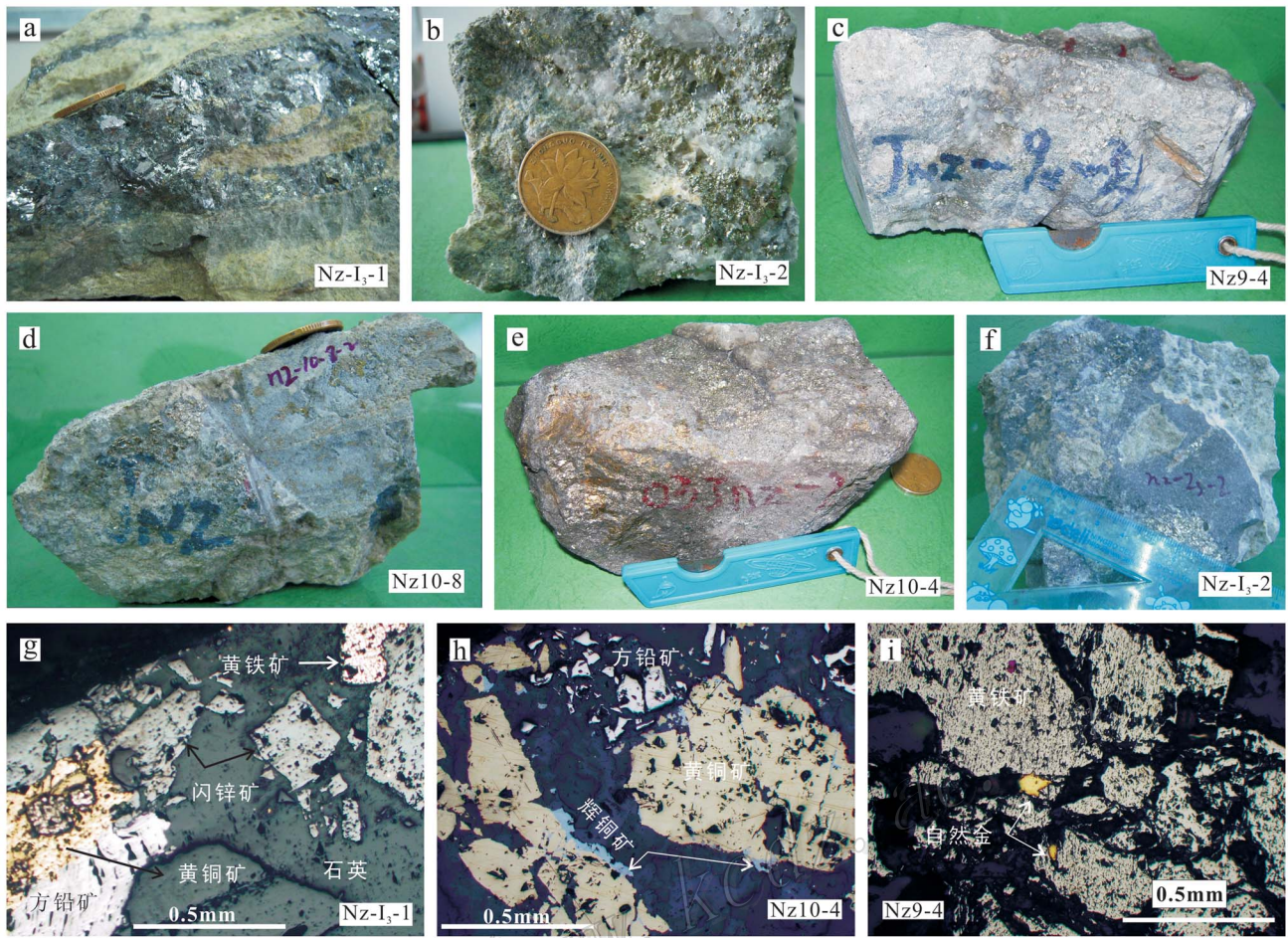


图2 闹枝铜金矿床矿石手标本及显微照片

a~f 为手标本照片: a. 脉状方铅矿石英脉(Nz-I₃-1); b, f. 含角砾的绿泥石化黄铁矿石英脉(Nz-I₃-2); c. 团块状黄铁矿石英脉(Nz9-4); d. 黄铜黄铁矿石英脉(Nz10-8); e. 多金属硫化物石英脉(Nz10-4); g~i 为光片显微照片: g. 金属矿物为方铅矿、闪锌矿, 有少量早期残留的黄铜矿及黄铁矿(Nz-I₃-1); h. 金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿及少量的辉铜矿、方铅矿、闪锌矿(Nz10-4); i. 主要为黄铁矿, 有少量的黄铜矿及自然金(Nz9-4)

Fig. 2 Hand specimens and microphotographs of ore-veins in the Naozhi copper-gold deposit

a~f. Photographs of hand specimens: a. Vein-type galena (Nz-I₃-1); b, f. Breccia-bearing chloritized pyrite-quartz vein (Nz-I₃-2); c. Massive pyrite-quartz veins (Nz9-4); d. Chalcopyrite and pyrite quartz vein (Nz10-8); e. Polymetallic sulfide quartz vein (Nz10-4); g~i. Microphotographs of thin sections: g. Quartz intergrown with galena, sphalerite and small amounts of residual chalcopyrite and pyrite (Nz-I₃-1); h. Quartz intergrown with chalcopyrite, pyrite and small amounts of chalcocite, galena, sphalerite (Nz10-4); i. Pyrite with small amounts of chalcopyrite and native gold (Nz9-4)

气液两相流体包裹体(L+V)

在黄铁矿石英脉和多金属硫化物石英脉或第Ⅱ、Ⅲ矿化阶段内最为发育。单个包裹体呈椭圆形、负晶形和不规则状, 以原生包裹体为主, 大小为 5~20 μm, 少量为 30 μm 左右, 占流体包裹体总数的 80%(图 3c、g、j、k、n、o、p)。其气体充填度(V/V+L)为 5%~60%, 富气相者(RV)可达 70%(图 3i、m)。不同气液比的流体包裹体共存, 沿矿物的生长带分布, 部分被晶体的后期增生边包围。气体充填度比值大者均一为气相, 反之, 则均一为液相。在方铅矿石的石英脉中, 该类型流体包裹体的直径较小, 一般为 4~6 μm。

纯液相流体包裹体(L)

主要产在第Ⅲ矿化阶段末及第Ⅳ矿化阶段。单个流体包裹体多呈不规则状, 大小为 6~15 μm, 在 10 号脉、9 号脉及方铅矿中均发育, 既有原生流体包裹体, 也有假次生、次生包裹体, 约占流体包裹体总数的 10%(图 3d、h、l)。

含子矿物的多相流体包裹体(L+V+S)

该类型流体包裹体在 10 号脉和含角砾的黄铁矿化蚀变岩中均有发现。单个流体包裹体呈半椭圆形或不规则状, 大小为 10~18 μm, 约占流体包裹体总数的 2%(图 3b、f)。子矿物有透明和不透明 2 类: ① 透明子矿物, 大小为 2~4 μm, 呈

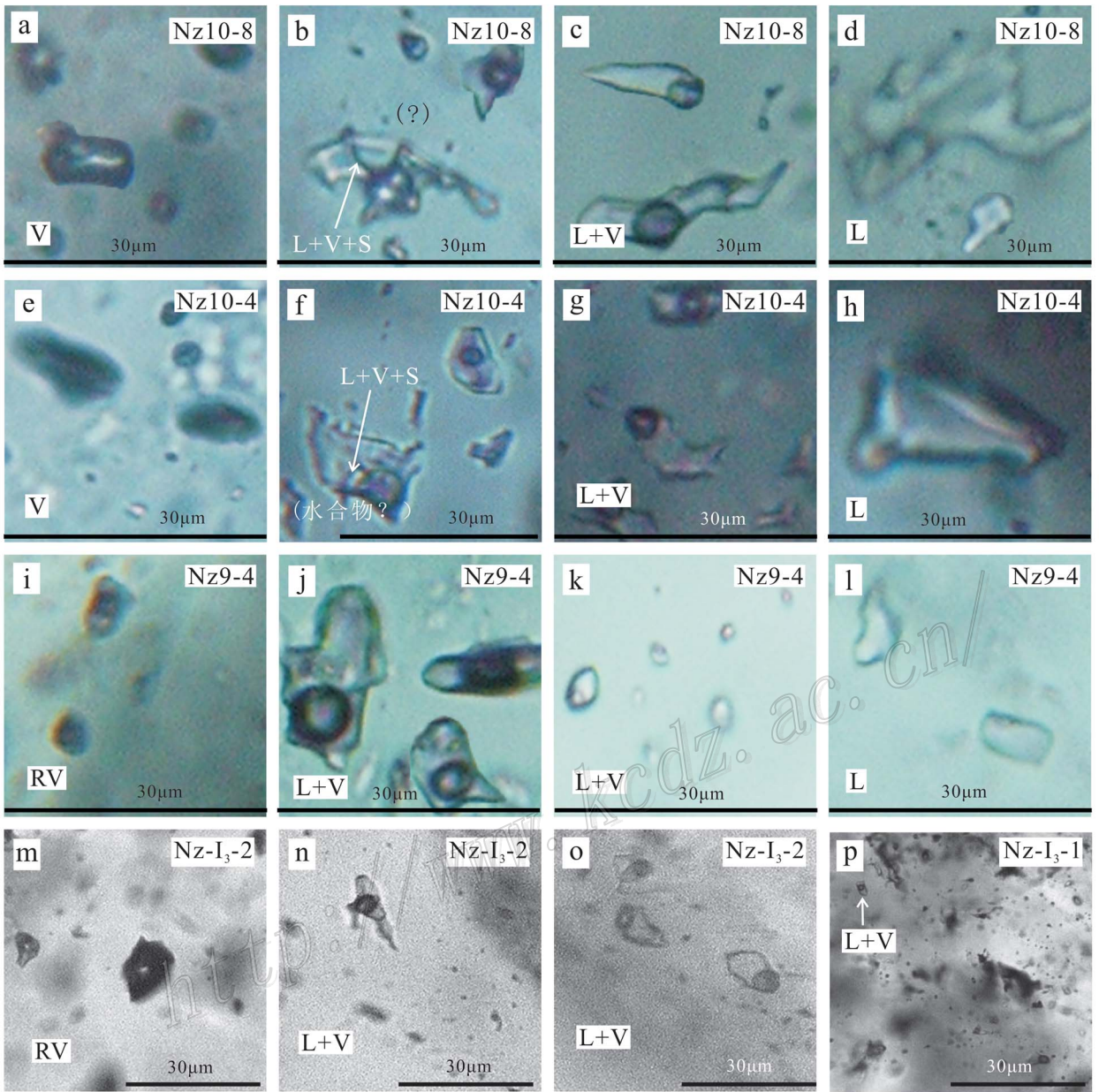


图 3 闹枝铜金矿床石英中流体包裹体的显微照片

V—纯气相；RV—富气相；L—液相；S—固相

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions in quartz from the Naozhi copper-gold deposit

V—Pure volatile phase; RV—Volatile-rich phase; L—Liquid phase; S—Solid phase

圆形，未均一，可能是硅酸盐或硫酸盐，也可能是被捕获的矿物颗粒而非子矿物；② 不透明子矿物，呈圆形，大小为 1~2 μm，加热至 550℃ 尚未均一，推测为黄铜矿。

3.2 流体包裹体均一温度和盐度

均一温度

上述 160 个诸类型单个流体包裹体的测温结果统计显示，其均一温度在 150~410℃ 之间，可分为 350~410℃、290~350℃、210~290℃、150~210℃ 4 个均一温度区间，与 4 个矿化阶段相对应(图 4)，其均值为 380℃、320℃、250℃ 和

180℃。但是，对黄铁绢英岩阶段(第 I 矿化阶段)所获得的均一温度数据较少，只从样品 Nz10-8(黄铜黄铁矿石英脉)和 Nz10-4(多金属硫化物石英脉)获得少量数据；只从样品 Nz10-4 获得了石英方解石脉阶段(第 IV 矿化阶段)的少量均一温度数据；从团块状黄铁矿石英脉(样品 Nz9-4)、含角砾的绿泥石化黄铁矿石英脉(样品 Nz-I₃-2)和方铅矿石中的石英脉(样品 Nz-I₃-1)，获得了很好的第 II、III 矿化阶段的均一温度数据(图 4)。第 I 温度区间为气液两相包裹体，其气体充填度主要为 30%~60%，为早期矿化阶段捕获的流体包裹体；

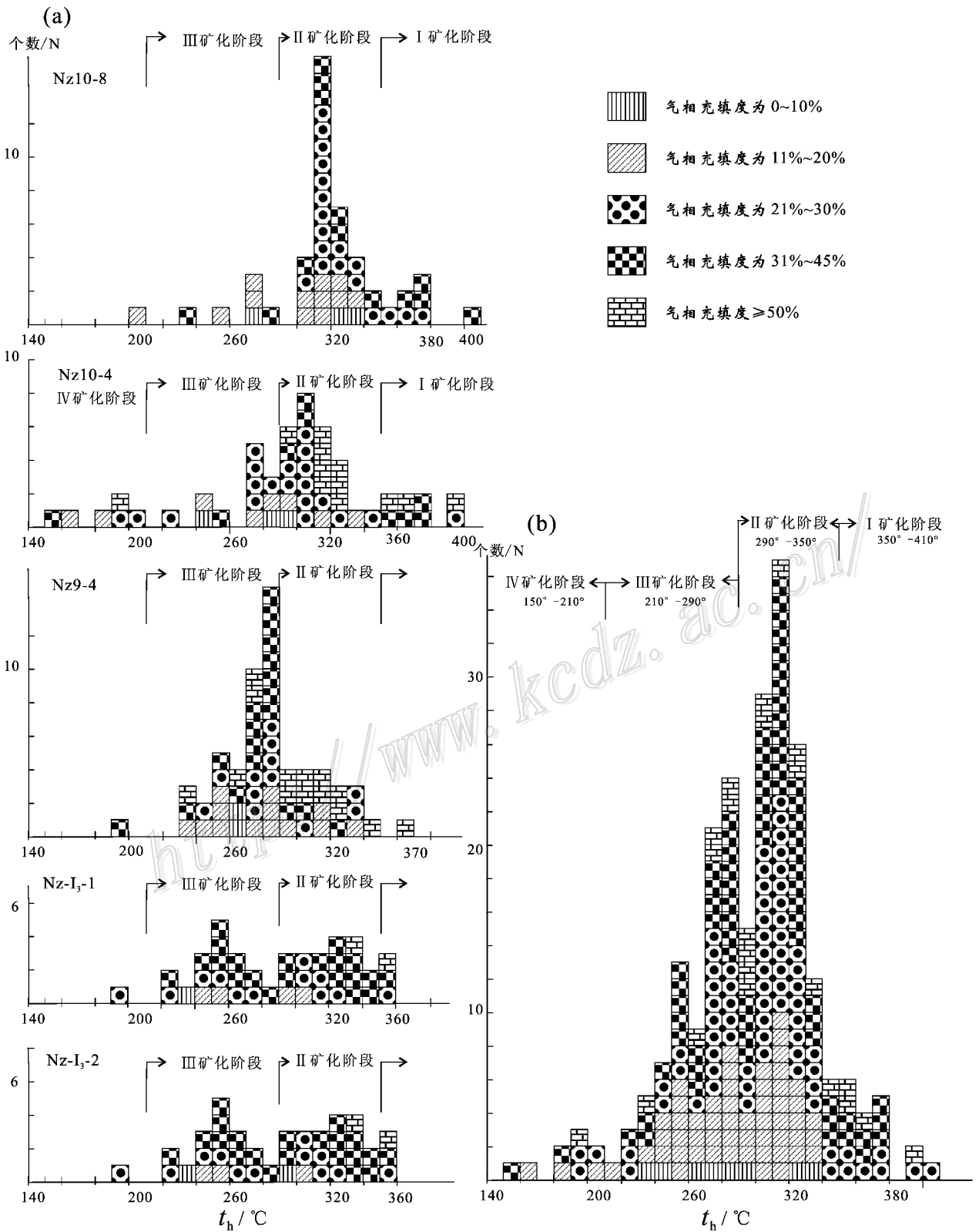


图 4 闹枝铜金矿床石英中流体包裹体均一温度直方图

a. 为不同样品的均一温度直方图；b. 为所有样品全部数据的均一温度直方图

Fig. 4 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in quartz from the Naozhi copper-gold deposit
a. representing single sample data ; b. representing data of all samples

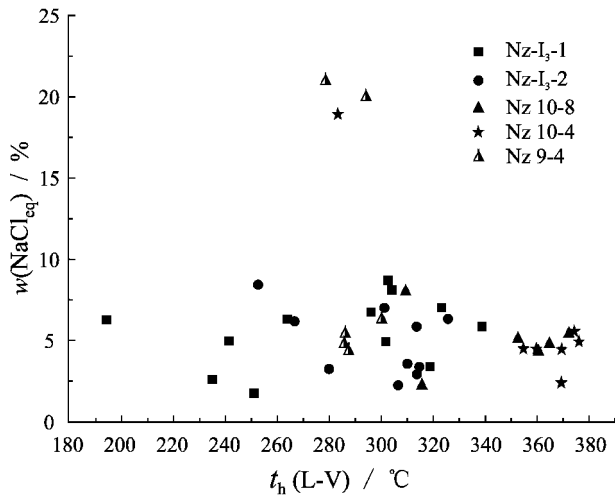


图 5 闹枝铜金矿床流体包裹体盐度-均一温度图

Fig. 5 Salinity versus homogenization temperature for fluid inclusions from the Naozhi copper-gold deposit

第 2 和第 3 温度区间主要为气液两相包裹体,其气体充填度为 10%~60%;第 4 温度区间为气液两相包裹体,其气体充填度主要为 15%~35%。

盐度

本次研究所获的冰点温度范围主要为 $-1 \sim -5.6^{\circ}\text{C}$,少数为 $-15.4 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 。根据所测得的 31 组冰点温度数据,采用 Hall(1988)及 Bischoff(1991)的盐度公式,求得盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.74%~20.97%,第 I、II、III 矿化阶段分别为 2.396%~5.548%、2.24%~8.68% 和 1.74%~8.41%,第 IV 矿化阶段只获得 1 个数据 6.3%(图 5)。获得了第 II 阶段末第 III 阶段初的几个高盐度数据,为 18.96%~20.97%。图 5 显示,第 I 矿化阶段的盐度介于第 II 与第 III 阶段之间,且在第 II 与第 III 阶段之间出现高盐度与低盐度共存的现象。

3.3 流体包裹体的成分

流体包裹体被喻为成矿溶液的原始样品,可作为解译成矿作用的密码(Vapnik et al., 2002),其数据可用来反演古流体系统的演化特征(范宏瑞等, 2001)。

本次研究的激光拉曼分析结果表明:含角砾的绿泥石化黄铁矿石英脉(Nz-I₃-2)中气液两相包裹体内的气体成分以 CO_2 和 H_2O 为主(图 6a, b),黄铜黄铁矿石英脉(Nz10-8)中气液两相流体包裹体内的气相成分以 H_2O 为主(图 6d, 峰值为 3421.5 cm^{-1})含有少量的 CO_2 (图 6e, 峰值为 1388.4 cm^{-1}),而多金属硫化物石英脉(Nz10-4)(图 6g, h, 峰值为 3428.1 cm^{-1} 和 3438.6 cm^{-1})团块状黄铁矿石英脉(Nz9-4)(图 6i, 峰值为 3480.8 cm^{-1})及方铅矿中石英脉(Nz-I₃-1)(图 6c)内气液两相包裹体的气相成分几乎全部为 H_2O 。这显示了成矿流体从早期以 H_2O 和 CO_2 为主,经 CO_2 逐渐减少,直到成矿后期主要为 H_2O 的演化过程。

4 讨论

4.1 流体性质与起源

前人曾对闹枝铜金矿床进行过 S、Pb、H、O 等同位素及石英内流体包裹体的研究(表 2)。黄圭成(1997)依据 Sr 、 S 、 O 和 H 同位素及流体包裹体的成分(F/Cl 比值和 Na/K 比值),认为其成矿流体来源于上地幔或深部地壳,属于与岩浆有关的热液矿床。芮宗瑶等(1995)和孟庆丽等(2001)依据 Sr 、 S 、 O 、 H 、 C 和 Pb 同位素研究,也认为其成矿流体为深部或幔源岩浆热液。苏凤霞等(2003)依据黄铁矿 Co/Ni 比值及 $\delta^{34}\text{S}$ 均值和极差,认为其为火山岩浆热液成因。

本文研究(图 4 和图 5)表明,硫化物石英脉中流体包裹体的均一温度范围为 $150 \sim 410^{\circ}\text{C}$,主成矿阶段为 $210 \sim 360^{\circ}\text{C}$,显示为中高温属性。图 5 显示出早期(第 I 矿化阶段)成矿流体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.396%~5.548%,为 中低盐度。流体包裹体的激光拉曼分析(图 6)表明,早期成矿流体的气体成分以 H_2O 和 CO_2 为主,与中温热液金矿床的特征一致(Mavrogenes et al., 1995),暗示其为地幔来源(刘丛强等, 2001);后期以水为主,揭示有大气水的加入,与 O 、 H 同位素研究结果相一致(梁俊红等, 2003)。而流体包裹体的岩相学研究表明,流体包裹体中含有少量的未知子矿物和金属子矿物,可能显示其为岩浆来源(李金祥等, 2006)。此外,该矿床的成矿时代为早白垩世(孟庆丽等, 2001),当时,该地区处于俯冲环境,佐证了其流体具有源自岩浆的属性。

铜金矿床的流体包裹体研究表明,流体可能有 3 种来源:① 大气水/火山源;② 浅成的岩浆源;③ 变质来源(Hassan et al., 2000)。

根据本文研究,结合前人研究成果,笔者认为,闹枝铜金矿床成矿流体的来源具有上地幔或下地壳岩浆源的属性,因此,可将该矿床归为斑岩型与浅成低温热液型之间的过渡类型,即中温岩浆热液矿床。

4.2 流体演化与成矿作用

在流体演化成矿方面, Burnham 等(1979)曾提出,含矿流体/初始水溶液的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $n\% \sim 20\%$,在 $< 800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 和 $50 \sim 150\text{ MPa}$ 条件下,常发生不混溶或流体沸腾作用,分离出一种低盐度的气相和高盐度的液相,沸腾作用可导致金属沉淀,其主要原因是挥发分的逸失(degassing),特别是 CO_2 和 H_2O 的逸失。

矿石结构、流体包裹体的物相及流体包裹体的均一方式等均表明,闹枝铜金矿床的成矿流体曾发生过弱沸腾作用。例如:矿石中见有角砾(图 2f)就流体包裹体的物相而言,孤立包裹体与群体包裹体共生(图 3),富气相的包裹体均一为气相,富液相的包裹体均一为液相;在第 II 和第 III 矿化阶段,主要为气液两相包裹体,其气体充填度变化较大,可从 10% 到 60%;在相同的均一温度区间内,流体的盐度差别很大(图 5)(Roedder, 1984)。

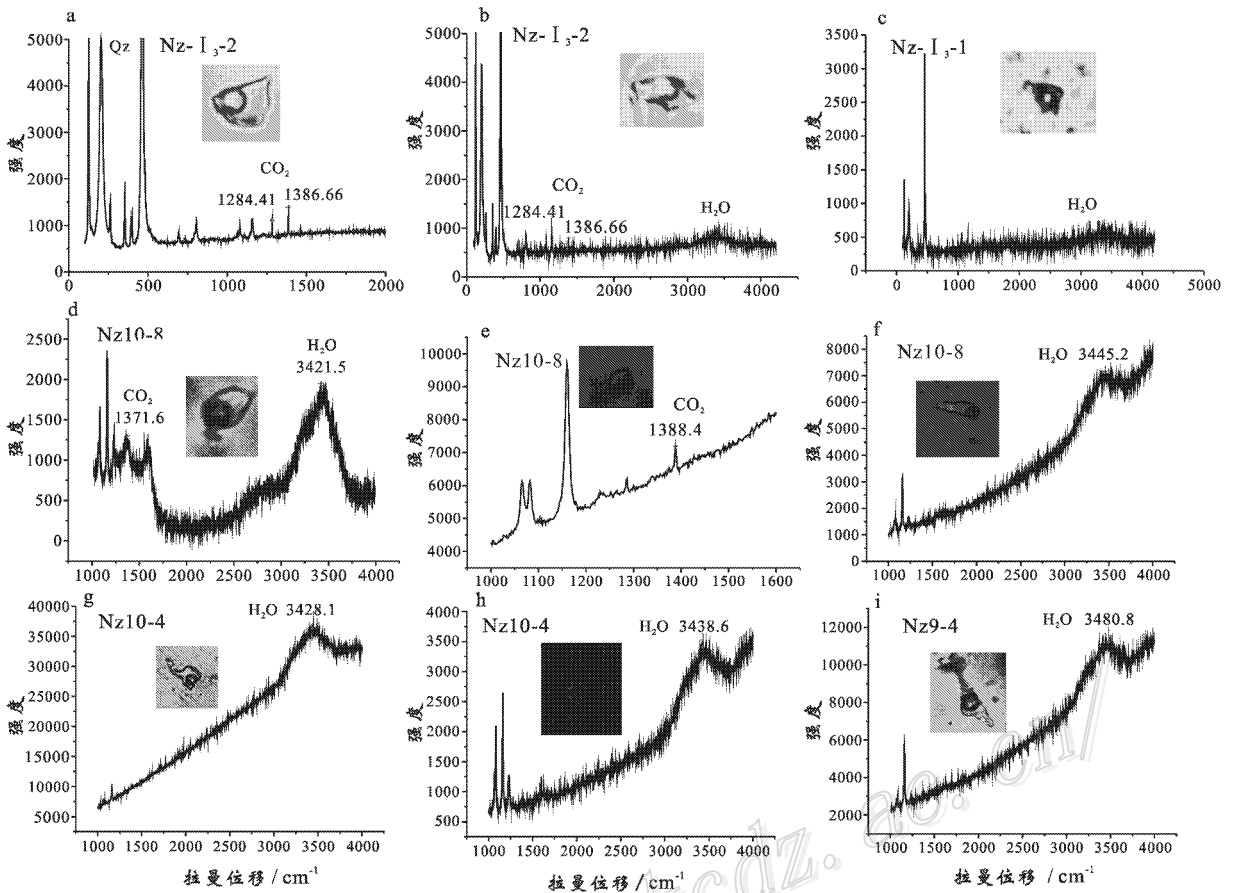


图 6 闹枝铜金矿床石英内流体包裹体气相成分的激光拉曼光谱

Fig. 6 Raman spectrograms of fluid inclusions in quartz from the Naozhi copper-gold deposit

表 2 闹枝铜金矿床的流体研究现状

Table 2 Research situation on ore-forming fluids of the Naozhi copper-gold deposit

资料来源	研究内容	研究结果
黄圭成(1997)	次火山岩的 Sr 同位素,黄铁矿和闪锌矿的 S 同位素,石英单矿物的 O 同位素及流体包裹体的 H 同位素,流体包裹体的成分(F/Cl 比值,Na/K 比值)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70342$; 10 个 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 2.009‰ $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 $-5.01\text{‰} \sim -4.53\text{‰}$ δD 均值为 -106.125‰ 均值: $\text{F}/\text{Cl}=1.58$ $\text{Na}/\text{K}=0.690$
芮宗瑶等(1995)	次火山岩的 Sr 同位素	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.703605
孟庆丽等(2001)	稳定同位素(S, O, H 及晚期方解石的 C 和方铅矿的 Pb)	$\delta^{34}\text{S}$ 为 $-1.5\text{‰} \sim +2.8\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 均值为 $-4.7\text{‰} \sim -4.68\text{‰}$, δD 均值为 -101.83‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-3\text{‰} \sim 7.5\text{‰}$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.355, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.555, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.233
苏凤霞等(2003)	黄铁矿的 Co/Ni 比值 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 均值及极差	Co/Ni 比值为 2~10 均值为 5.45(岩浆成因的比值为 1~5) $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.841\text{‰} \sim 2.432\text{‰}$ 极差为 0.591
冯守忠(1994)	稳定同位素(S, O, H)特征	$\delta^{34}\text{S}$ 为 $-1.5\text{‰} \sim +2.8\text{‰}$ δD 均值为 -94‰ $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 均值为 5.87‰

需要指出的是,本文所研究的闹枝矿床与其他典型的发生过沸腾作用的矿床的不同之处,在于未曾发现典型的石盐或钾盐子矿物,但野外观察和实验数据均显示其确实发生过沸腾作用,因此,笔者认为其发生过弱沸腾作用。

在不同的矿化阶段,流体包裹体的均一温度、盐度和气体

成分的变化(图 6)及矿物共生组合的改变,都揭示了流体在 4 个矿化阶段的演化过程。

第 I 矿化阶段 与石英+黄铁矿+绢云母共生组合(黄铁绢英岩化)相对应,成矿流体具有如下特征:流体包裹体类型为少量含未均一子矿物的富气相的包裹体,其均一温度为

350~410℃, 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.396%~5.548%, 流体的气体成分主要为 H_2O 和 CO_2 。

第 II 矿化阶段 主要为石英+黄铁矿+黄铜矿, 流体包裹体的均一温度为 290~350℃, 富气相、气液两相及富液相的包裹体共存。图 5 显示, 320~350℃ 区间的盐度比第 I 矿化阶段略有升高, 为 5.86%~7.02%; 在 320~290℃ 温度区间出现了 6.3%~8.68% 及 2.24%~4.96% 2 个 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 区间。这都显示出开始发生沸腾作用, CO_2 和 H_2O 等的逸失使流体由弱酸性和氧化性质转变为弱碱性和还原性质, 黄铜矿、黄铁矿及部分金沉淀, 形成了含金黄铁矿硫化物石英脉。

第 III 矿化阶段 在 250~290℃ 温度条件下, 流体继续沸腾, 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.74%~20.97%, 明显是低盐度流体与高盐度流体共存(图 5); 在 250℃ 左右, 以气体充填度降低的气液两相包裹体为主(图 4), 大气水的混入使流体的 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 降低为 2.57%~4.96%(图 5), 方铅矿、闪锌矿等多金属硫化物石英脉形成, 金在多金属硫化物石英脉内大量沉淀(Heinrich et al., 1992; 1999; Stephan et al., 1995)。

第 IV 矿化阶段 以石英+方解石为主。流体包裹体以富液相及纯液相包裹体为主, 其均一温度为 150~210℃, 气体成分主要为 H_2O , 流体的盐度、矿化度及 pH 值均降低。矿化进入尾声, 温度、压力大为降低, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等趋近于贫乏, 而且随着距地表越近, CO_2 (HCO_3^-) 加入量增大, 导致方解石大量产出, 并形成一套石英、黄铁矿及少量绿泥石等的典型低温矿物组合, 从而不再有利于 Au 及金属硫化物的沉淀。

5 结 论

综上所述, 可得出如下结论:

(1) 闹枝铜金矿床可分出 4 个矿化阶段, 即黄铁绢英岩阶段、石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英方解石脉阶段, 其流体包裹体的均一温度为 150~410℃, 主成矿(第 II、III)阶段的温度为 210~350℃。

(2) 硫化物石英脉中流体包裹体的类型主要为气液两相, 有少量含未知透明子矿物及硫化物子矿物的包裹体。

(3) 第 I 矿化阶段流体的盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.396%~5.548%, 主成矿阶段出现高盐度($\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 20.97%~6.3%) 流体与低盐度($\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.74%~4.96%) 流体共存。

(4) 成矿流体为源于上地幔或下地壳深源的中高温、中低盐度、气体成分以 H_2O 和 CO_2 为主的岩浆热液, 后期则有大气水的加入。

(5) 在成矿作用过程中, 成矿流体发生的弱沸腾作用是前期金铜沉淀的主要机制, 沸腾的温度区间为 250~320℃; 大气水的加入使流体的盐度降低, 是后期金和多金属硫化物沉淀的主要原因。

志 谢 在流体包裹体测温和成分测定过程中, 笔者得到吉林大学地球科学学院地质流体实验室王力老师、南京大学成矿作用国家重点实验室倪培教授、研究生王宪刚等以及北京核工业地质研究所张敏的诸多帮助, 在此表示衷心感谢!

References

- Bischoff J L. 1991. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O solution: A P V T χ summary of from 300°C to 500°C [J]. *Amer. J. Sci.*, 291: 309-338.
- Burnham C W. 1979. Magmas and hydrothermal fluids [A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (2nd ed) [C]. New York: Wiley & Sons. 71-136.
- Chen R Y and Rui Z Y. 1993. Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Wufeng epithermal gold deposit, Jilin Province [J]. *Mineral Deposits*, 12(1): 20-28 (in Chinese with English abstract).
- Echavarría L, Nelson E and Humphrey J. 2006. Geologic evolution of the Caylloma epithermal vein district, Southern Peru [J]. *Econ. Geol.*, 101: 843-863.
- Fan H R, Xie Y H and Zhai M G. 2001. Study on ore-forming fluid of Dongping gold deposit, northwest Hebei [J]. *Science in China (Series D)*, 34(7): 537-544 (in Chinese).
- Feng S Z. 1994. Geological characteristics and metallogenic model of Naozhi gold deposit, in Wangqing [J]. *Gold Geological Science*, 39(1): 23-26 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution [J]. *Econ. Geol.*, 83: 197-202.
- Hassan Z and Harra Z. 2000. A genetic model for a mesothermal Au deposit: Evidence from fluid inclusions and stable isotopic studies at El Sid Gold Mine, Eastern Desert, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 30(2): 267-282.
- Heinrich C A, Guenther D and Audetat A. 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusion [J]. *Geol.*, 27(8): 755-758.
- Heinrich C A, Ryan C G and Mernagh T P. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: A fluid inclusion study using PIXE microanalysis [J]. *Econ. Geol.*, 87: 1566-1583.
- Huang G C. 1997. Discussion on genetic relation between the Naozhi gold deposit and the Mesozoic volcanic rock series in Naozhi, Jilin Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11(57): 32-38 (in Chinese with English abstract).
- Jin D G. 1987. Metallogenic regularity of volcanic-type gold deposits, in Jilin Provinces [J]. *Jilin Geology*, (3): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z and Li G M. 2006. Basic characteristics of gold-rich porphyry copper deposits and their ore sources and evolving processes of high oxidation magma and ore-forming fluid [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 678-688 (in Chinese with English abstract).
- Liang J H, Jin C S and Wang J G. 2003. The hydrogen and oxygen isotope characteristics of epithermal-porphyry gold series in Yanbian re-

- gior[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research , 18(2): 108-112(in Chinese with English abstract).
- Liu C Q , Huang Z L , Li H P and Sun G L . 2001 . The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. Earth Science Frontiers , 8(4): 231-243(in Chinese with English abstract).
- Liu D Z and Wang X G . 1987 . Tectonic characteristics and mineralization of chalcopyrite belt , in Xiaoxinancha deposit[J]. Jilin Geology , (11): 76-82(in Chinese with English abstract).
- Liu W D and Wan Y S . 1984 . Geological characteristics and metallogenic regularity of volcanic-type gold deposit of norther Yanbian area , in Jilin Provinces[J]. Jilin Geology , (4): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Liu W D , W J P and Liu Q T . 1984 . Tectonic characteristics of volcanic-type gold ore belt , in norther Yanbian area[J]. Jilin Geology , (2): 20-30(in Chinese with English abstract).
- Mavrogenes J A , Bodnar R J , Graney J R , McQueen K G and Burlinson K . 1995 . Comparison of decrepitation , microthermometric and compositional characteristics of fluid inclusions in barren and auriferous mesothermal quartz veins of the Cowra Creek Gold District , New South Wales , Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration , 54 : 167-175 .
- Meng Q L , Zhou Y C and Chai S L . 2001 . The porphy-epithermal veins copper-gold deposits , in Eastern Jilin and Heilongjiang[M]. Jilin Science Press . 84-99(in Chinese).
- Rui Z Y , Zhang H T , Wang L S and Chen R Y . 1995 . The multiple metallogenic model of the porphy-epithermal copper-gold deposits , in Eastern Jilin and Heilongjiang[J]. Mineral Deposits , 14(2): 174-183(in Chinese with English abstract).
- Roedder E . 1984 . Fluid inclusions reviews in mineralogy[J]. Mineral Society of America , 12 : 644 .
- Song G . 1984 . Geological characteristics and metallogenic condition of breccia pipe Pb-Zn deposit , Xinxing , in Jilin Province[J]. Jilin Geology , (4): 46-53(in Chinese with English abstract).
- Stephan M K , Henley R W and Christoph H A . 1995 . Gold precipitation by fluid mixing in bedding-parallel fractures near carbonaceous slates at the cosmopolitan how gold deposit , Northern Australia[J]. Econ. Geol. , 90 : 2123-2139 .
- Su F X , Wang X Y and Jia W G . 2003 . Study on typomorphic characteristics of pyrite in the Naozhi gold deposit , Jilin[J]. Gold , 24(5): 13-16(in Chinese with English abstract).
- Vapnik Y and Moroz I . 2002 . Compositions and formation conditions of fluid inclusions in emerald from the Maria deposit(Mozambique) [J]. Mineralogical Magazine , 66(1): 201-213 .
- Zhao X C . 1987 . Geological characteristics and genesis volcanic-type gold deposits of Mesozoic , Jilin Province[J]. Jilin Geology , (2): 7-14(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈仁义 , 芮宗瑶 . 1993 . 五凤浅成热液金矿床地质特征及成矿机理研究[J]. 矿床地质 , 12(1): 20-28 .
- 范宏瑞 , 谢奕汉 , 翟明国 . 2001 . 冀西北东坪金矿成矿流体研究[J]. 中国科学(D 辑) , 31(7): 537-544 .
- 冯守忠 . 1994 . 汪清县闹枝金矿床地质特征及成矿模式[J]. 黄金地质科技 , 39(1): 23-26 .
- 黄圭成 . 1997 . 闹枝金矿床与中生代火山岩系的成因关系探讨[J]. 矿产与地质 , 11(57): 32-38 .
- 金顿镐 . 1987 . 吉林省中生代火山岩型金矿成矿规律[J]. 吉林地质 , (3): 1-10 .
- 李金祥 , 秦克章 , 李光明 . 2006 . 富金斑岩型铜矿床的基本特征、成矿物质来源与成矿高氧化岩浆-流体演化[J]. 岩石学报 , 22(3): 678-688 .
- 梁俊红 , 金成洙 , 王建国 . 2003 . 延边地区浅成低温热液-斑岩型金矿成矿系列的氢、氧同位素特征[J]. 地质找矿论丛 , 18(2): 108-112 .
- 刘丛强 , 黄智龙 , 李和平 , 苏根利 . 2001 . 地幔流体及成矿作用[J]. 地学前缘 , 8(4): 231-243 .
- 刘大瞻 , 王晓功 . 1987 . 小西南岔黄铜矿带的构造特征及其控矿作用[J]. 吉林地质 (11): 76-82 .
- 刘文达 , 王玉胜 . 1984a . 吉林延边北部火山型金矿地质特征及成矿规律[J]. 吉林地质 (4): 1-13 .
- 刘文达 , 王建平 , 柳启太 . 1984b . 延边北部火山岩型金矿带的构造特点[J]. 吉林地质 (2): 20-30 .
- 孟庆丽 , 周永昶 , 柴社立 . 2001 . 中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床[M]. 长春 : 吉林科学技术出版社 . 84-99 .
- 芮宗瑶 , 张洪涛 , 王龙生 , 陈仁义 . 1995 . 吉黑东部斑岩型-浅成热液型铜金矿床多重成矿模型[J]. 矿床地质 , 14(2): 174-183 .
- 宋 贵 . 1984 . 吉林省天宝山新兴角砾岩筒铅锌矿床地质特征与成矿条件[J]. 吉林地质 (4): 46-53 .
- 苏凤霞 , 王晓勇 , 贾伟光 . 2003 . 吉林闹枝金矿床黄铁矿的标型特征研究[J]. 黄金 , 24(5): 13-16 .
- 赵源成 . 1987 . 吉林省中生代火山岩型金矿地质特征及其成因探讨[J]. 吉林地质 , (2): 7-1 .