

doi: 10.12029/gc20180309

门兰静, 张馨文, 孙景贵, 赵俊康, 王好均, 刘城先. 2018. 延边地区小西南岔富金铜矿床的成矿机理: 矿物流体包裹体和同位素的制约[J]. 中国地质, 45(3): 544–563.

Men Lanjing, Zhang Xinwen, Sun Jinggui, Zhao Junkang, Wang Haojun, Liu Chengxian. 2018. Metallogenic mechanism of the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian area, Jilin Province: Constrains from fluid inclusions and isotope geochemistry[J]. *Geology in China*, 45(3): 544–563 (in Chinese with English abstract).

# 延边地区小西南岔富金铜矿床的成矿机理: 矿物流体包裹体和同位素的制约

门兰静<sup>1</sup> 张馨文<sup>2</sup> 孙景贵<sup>2</sup> 赵俊康<sup>3</sup> 王好均<sup>1</sup> 刘城先<sup>1</sup>

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 紫金矿业有限公司, 福建 厦门 361009)

**摘要:**小西南岔富金铜矿床是中国东部陆缘重要的热液矿床, 由不同矿石品位和矿体特征的南山、北山两个矿段组成, 矿化形式分别为脉状、细脉浸染状。流体包裹体研究表明: 北山矿段均一温度为 120~470℃, I 矿化阶段流体盐度为 10.1%~20.0% NaCl eqv, II、III 矿化阶段盐度变化大, 为 0.4%~45.5% NaCl eqv, 流体气相成分为 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>, 少量 N<sub>2</sub>。南山矿段均一温度为 150~450℃, I 成矿阶段盐度为 4.0%~11.1% NaCl eqv, II、III 矿化阶段盐度随着温度降低盐度逐渐减小, 气相成分主要是 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>; 似斑状角闪花岗闪长岩石英内流体包裹体与南、北山矿段流体显示相近的均一温度范围(150~510℃)和气体成分, 盐度 4.9%~11.5% NaCl eqv 与南山矿段 I 成矿阶段流体相似。流体包裹体的显微测温、氢氧同位素, 稀有气体同位素和 Pb 同位素结果表明南山矿段的成矿过程为幔源中低盐度流体在围岩裂隙中随着温度、压力降低以充填结晶作用为主而成矿; 北山矿段成矿过程为幔源中低盐度流体发生沸腾作用后, 与地壳流体混合, 随后成矿流体以交代方式成矿, 晚阶段两个矿区在大气水的混入作用下, 北山矿段形成胶黄铁矿石英脉, 南山矿段形成纯硫化物脉; 似斑状角闪花岗闪长岩内流体包裹体特征反映了初始含矿流体属性, 为中低盐度幔源岩浆热流体。

**关键词:** 流体演化; 成矿机理; 小西南岔富金铜矿床; 延边地区

中图分类号: P618.41; P618.51; P597

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2018)03-0544-20

## Metallogenic mechanism of the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian area, Jilin Province: Constrains from fluid inclusions and isotope geochemistry

MEN Lanjing<sup>1</sup>, ZHANG Xinwen<sup>2</sup>, SUN Jinggui<sup>2</sup>, ZHAO Junkang<sup>3</sup>,  
WANG Haojun<sup>1</sup>, LIU Chengxian<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, Jilin, China; 2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 3. Zijin Mining Industry Groups Co., Ltd., Xiamen 361009, Fujian, China)

**Abstract:** The Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit is an important hydrothermal deposit in eastern China. The deposit includes two

收稿日期: 2017-11-14; 改回日期: 2018-03-02

基金项目: 吉林省科技厅科研基金项目(120160038, 120140075)、吉林省科技发展计划项目(20180101310JC, 20180520086JH)及国家自然科学基金项目(40772052)联合资助。

作者简介: 门兰静, 汉族, 女, 1981 生, 博士, 讲师, 矿床地球化学专业; E-mail: menjinglan4668872@126.com。

mineralization stage and II–III mineralization stage are 10.1%–20.0% NaCl eqv and 0.4%–45.5% NaCl eqv, respectively, with the gas composition consisting mainly of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> in the North mine. The South mine fluids yield  $T_{h, total}$  of 150 to 450 °C, salinities of 4.0%–11.1% NaCl eqv in the I mineralization stage, and the salinities in the II–III mineralization stage decrease with the decreasing temperatures, and the main gas composition consists of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>. The quartz–hosted fluid inclusions in the hornblende–granodiorite have homogenization temperatures of 150 to 510 °C, and salinities of 4.9%–11.5% NaCl eqv, being similar to those in the North and South mine. The authors hold that the North mine was formed by replacement of fluids which experienced mixing with crustal fluids in the Wudaogou Group after the boiling, whereas the South mine was mainly formed through filling–crystallization of the initial ore–forming fluids with the decreasing temperatures and pressures, and the ore–forming fluids that involved the meteoric water in the mid–late stage produced melnikovite–quartz veins in the North mine and pure sulfide veins in the South mine. The fluid inclusions in the hornblende–granodiorite possibly reveal initial ore–forming fluid signatures characterized by low–moderate salinity and mantle–derived magmatic fluids.

**Keywords:** fluid evolution; metallogenic mechanism; Xiaoxinancha Au–rich Cu deposit; Yanbian area

**About the first author:** MEN Lanjing, female, born in 1981, lecturer, doctor, majors in geochemistry of mineral deposit; E–mail: menjinglan4668872@126.com.

**Fund support:** Supported by Science Research Foundation of Jilin Province (No. 120160038, 120140075), Plan Project about the development of Jilin Province Science and Technology (No. 20180101310JC, 20180520086JH) and National Natural Science Foundation of China (No. 40772052).

## 1 引言

延边小西南岔富金铜矿床是中国东部陆缘重要金铜矿床之一,该矿床以香房河断裂为界分为南山、北山两个矿段,矿化形式分别为脉状、细脉浸染状,赋矿围岩为晚古生代浅变质岩和花岗闪长岩体。自20世纪50年代末发现以来,曾有学者对其进行过矿床地质、地球化学等方面研究(孙超,1994;李荫清等,1995;芮宗瑶等,1995;孟庆丽等,2001;周燕等,2004;赵宏光,2007;赵俊康等,2008;王可勇等,2010),认为该矿床是“斑岩铜矿床”或“富金斑岩铜矿床”。笔者研究发现:闪长玢岩脉与南、北山两矿段密切伴生,局部可见侵入切割矿体现象;矿区北端、西端呈岩柱状产出的花岗质杂岩(中细粒黑云母二长花岗岩–中细粒黑云母花岗闪长岩–似斑状角闪花岗闪长岩)Cu元素含量高并发育黄铁矿化(孙景贵等,2009),其年代学数据与该矿床的辉钼矿 Re–Os 年龄耦合(任云生等,2011),表明与成矿有关的热事件为闪长玢岩与花岗质杂岩(孙景贵等,2008a, b)(图1),但它们都不是矿体的直接赋矿围岩,因此认为该矿床并非典型的斑岩型矿床,为中高温岩浆热液富金铜矿床更合适(孙景贵等,

2009),两矿段的围岩蚀变、矿化类型基本相同,为同一成矿作用的产物,但该类矿床的成矿流体、特征及演化是否与斑岩型铜矿相同及南、北两矿段的成矿机理是否相同,目前研究较少。本文通过对该矿床不同矿化蚀变阶段的矿石和与成矿时空关系密切的花岗质杂岩中石英内流体包裹体进行岩相学、显微测温、单个流体包裹体的拉曼测试、同位素等系统的对比研究,探讨该矿床的流体起源与演化机理,以期今后研究此类矿床的成因和成矿模式提供范例。

## 2 成矿地质背景及矿床地质概况

延边地区位于中国东北吉林省东部,地处中亚造山带(天山–兴蒙造山带)东端,夹持于佳木斯地块、兴凯地块、华北板块之间(图1),是一个经历古亚洲洋演化和兴蒙造山对接、中生代古太平洋板块俯冲以及新生代超壳断裂作用叠加的复合构造区(孙景贵等,2006),因此该区岩浆活动强烈,内生热液金铜矿床发育(图1)。区域出露的地层有晚古生代海相火山–沉积岩系、中生代陆相火山–沉积岩系、新近纪玄武岩和第四纪陆源碎屑沉积物(靳克,2003);侵入岩时代主要有晚二叠世(260–245 Ma)、

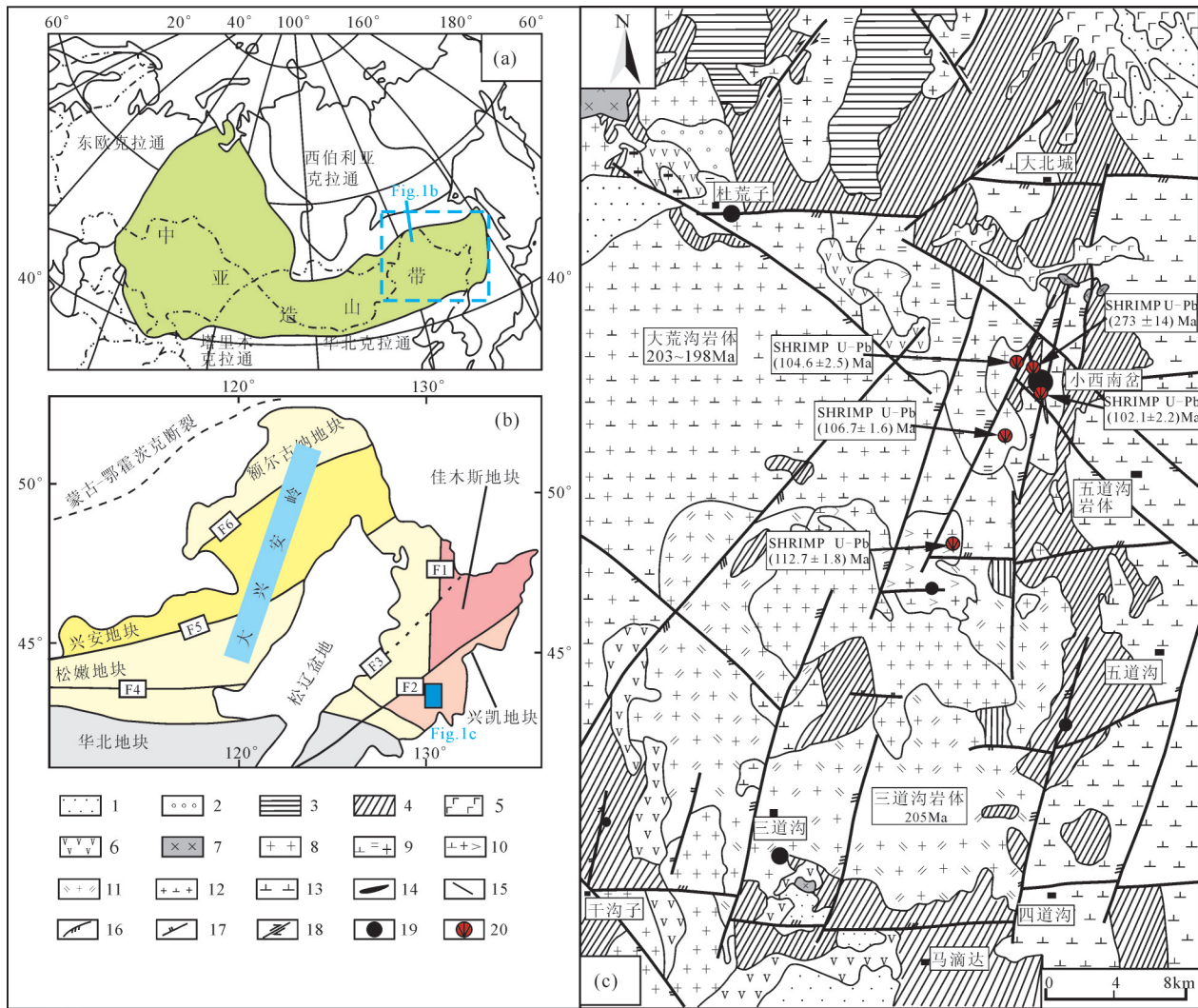


图1 延边小西南岔富金铜矿床的大地构造背景(a, b)及地质图(c) (据郑斗范等, 1983)

- 1—新生代地层; 2—中生代白垩系; 3—中生代三叠系; 4—晚古生代五道沟组; 5—新生代玄武岩; 6—中生代火山岩; 7—早白垩世闪长玢岩; 8—早白垩世黑云母二长花岗岩; 9—早白垩世中细粒黑云母花岗闪长岩; 10—早白垩世似斑状角闪花岗岩闪长岩; 11—早侏罗世二长花岗岩; 12—早侏罗世花岗闪长岩; 13—晚二叠世闪长岩; 14—晚二叠世辉长辉绿岩; 15—性质不明断裂; 16—压扭性断裂; 17—张性断裂; 18—扭性断裂; 19—金铜矿床(点); 20—锆石样品采样点; F1—牡丹江断裂; F2—敦化—密山断裂; F3—伊通—依兰断裂; F4—西拉木伦—长春断裂; F5—嫩江断裂; F6—塔源—喜桂图断裂

Fig.1 Tectonic settings (a,b) and geologic map (c) of the Xiaoxinancha gold-rich copper deposit, Yanbian (after Zheng et al., 1983)

- 1—Cenozoic strata; 2—Mesozoic Cretaceous; 3— Mesozoic Triassic; 4—Late Paleozoic Wudaogou Formation; 5—Neozoic basalt; 6—Mesozoic volcanics; 7—Early-Cretaceous dioritic-porphyrite; 8— Early-Cretaceous biotite-monzogranite; 9—Early-Cretaceous medium-fine grained biotite-granodiorite; 10— Early-Cretaceous porphyreous hornblende-granodiorite; 11—Early-Jurassic monzogranite; 12—Early-Jurassic granodiorite; 13—Late-Permian diorite; 14— Late-Permian gabbro-diabase; 15—Unknown fault; 16—Compressive-shear fault; 17—Tensional fault; 18—Shear fault; 19—Au-Cu deposit (ore spot); 20—Zircon sampling location; F1—Mudanjiang fault; F2—Dunhua-Mishan Fault; F3—Yitong-Yilan fault; F4—Xilamulun-Changchun fault; F5—Nenjiang fault; F6—Tayuan-Xiguitu fault

三叠纪(225~200 Ma)、早侏罗世(190~180 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和早白垩世(130 Ma)(张艳斌, 2002)和早白垩世晚期花岗质杂岩(113~105 Ma)(孙景贵等, 2008b)。

小西南岔矿床是中国东北部大型金铜矿床之一, 目前Au勘探储量为31 t, Cu为8.8 Mt。产在小

西南岔—烟筒砬子近南北向断裂体系的北段, 矿区内出露的地质体主要是五道沟群、晚二叠世辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩、早中侏罗世花岗闪长岩-二长花岗岩和早白垩世花岗质杂岩等。已勘探圈出30余个矿体, 以北东向香房河断裂为界分为南、北两个矿段(图2)。北山矿段由2个矿带组成(图

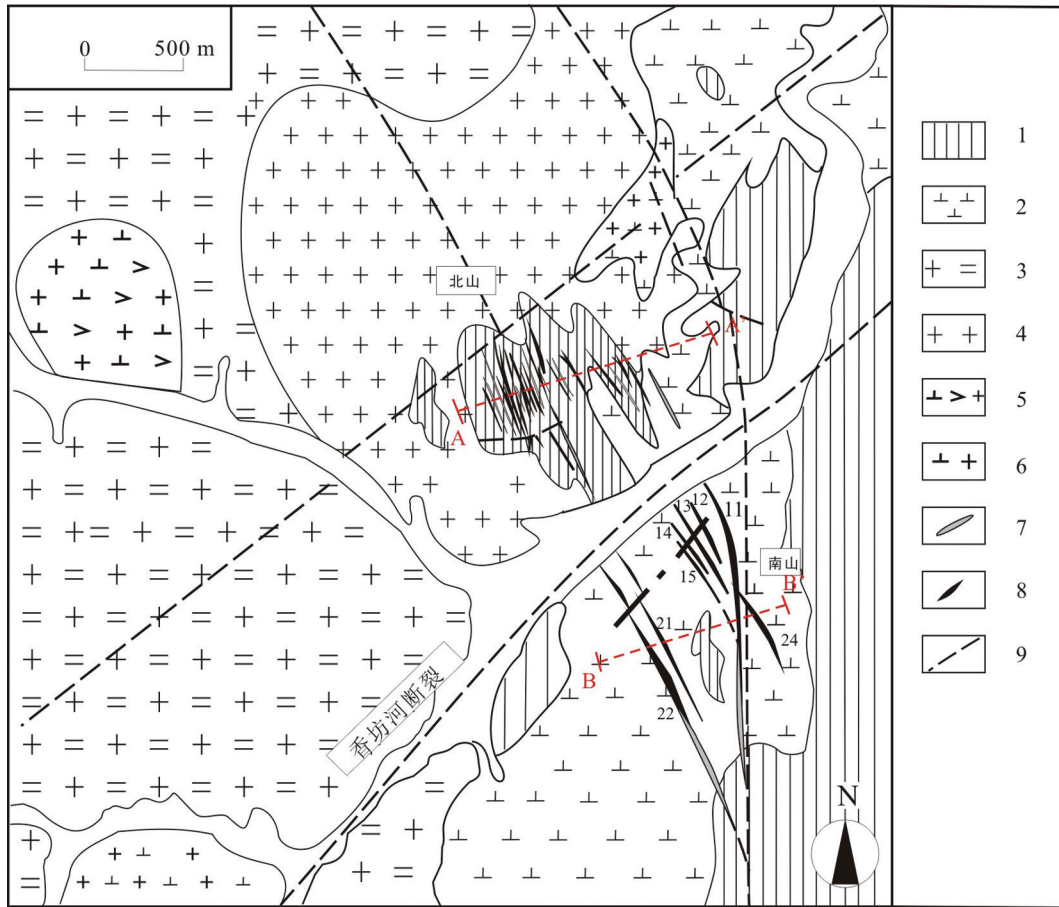


图2 小西南岔富金铜矿床矿区地质图(据郑斗范等,1983 修编)

1—古生代变质岩;2—石英闪长岩;3—花岗闪长岩;4—黑云母二长花岗岩;5—早白垩世细粒花岗岩;6—黑云母花岗闪长岩;  
7—闪长玢岩-英安斑岩;8—矿脉及编号;9—断层;A-A' 和 B-B' 代表图 3a 和 3b 切面的位置

Fig. 2 Geological map of the Xiaoxinancha gold-rich copper deposit(after Zheng et al.,1983)

1—Paleozoic metamorphic rocks; 2—Quartz diorite; 3—Granodiorite; 4—Biotite-monogranite;  
5—Early-Cretaceous fine-grained granite; 6—Biotite-granodiorite; 7—Diorite porphyry-dacite porphyry; 8—Vein and its serial number;  
9—fault A-A' and B-B' represent the location of the cross sections of Figs. 3a and 3b

3a),与围岩界线不清楚,长度250~980 m,厚0.25~21 m,向下延伸100~680 m,矿石的平均品位Cu为0.21%,Au为 $0.97 \times 10^{-6}$ ,产在小西南岔近南北向断裂的北北西向次级断裂系内,以细脉浸染状构造为主(图4a),赋矿岩石是晚二叠世闪长岩和晚古生代五道沟群变质岩系(于介江等,2008),矿石矿物主要是黄铜矿(图4b),其次是磁黄铁矿、黄铁矿,可见毒砂、胶黄铁矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然金、银金矿及磁铁矿等;围岩蚀变类型主要是黑云母化、阳起石化、透闪石化、绿帘石化、硅化及绢云母化,矿石为细脉浸染状构造,局部团块状构造,间或出现5~30 cm的硫化物石英脉和方解石脉(图4a、b)。南山矿段主要呈脉状(图3b),产在小西南岔近

南北向断裂内,有7个矿体,长度为600~1500 m,厚度为0.11~6.3 m,向下延伸>100~450 m,主要矿体为11号脉,矿石的平均品位Cu为7.8%,Au为 $4.58 \times 10^{-6}$ ,赋矿围岩为晚二叠世闪长岩(265 Ma)(孙景贵等,2008a),围岩蚀变主要为钾化、黑云母化、绿泥石化、绢云母化、硅化;矿石矿物主要是磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿,其次是闪锌矿、方铅矿、自然金、银金矿等;矿石多呈脉状产出(图4c、d),发育块状构造(图4e),可见梳状、带状及晶洞构造等,伴生闪长玢岩脉(图4d)。

依据野外地质和矿相学特征,将该矿床的矿化过程划分4个矿化阶段,从早到晚依次为:

(I) 石英-贫硫化物阶段:该阶段在南山矿段

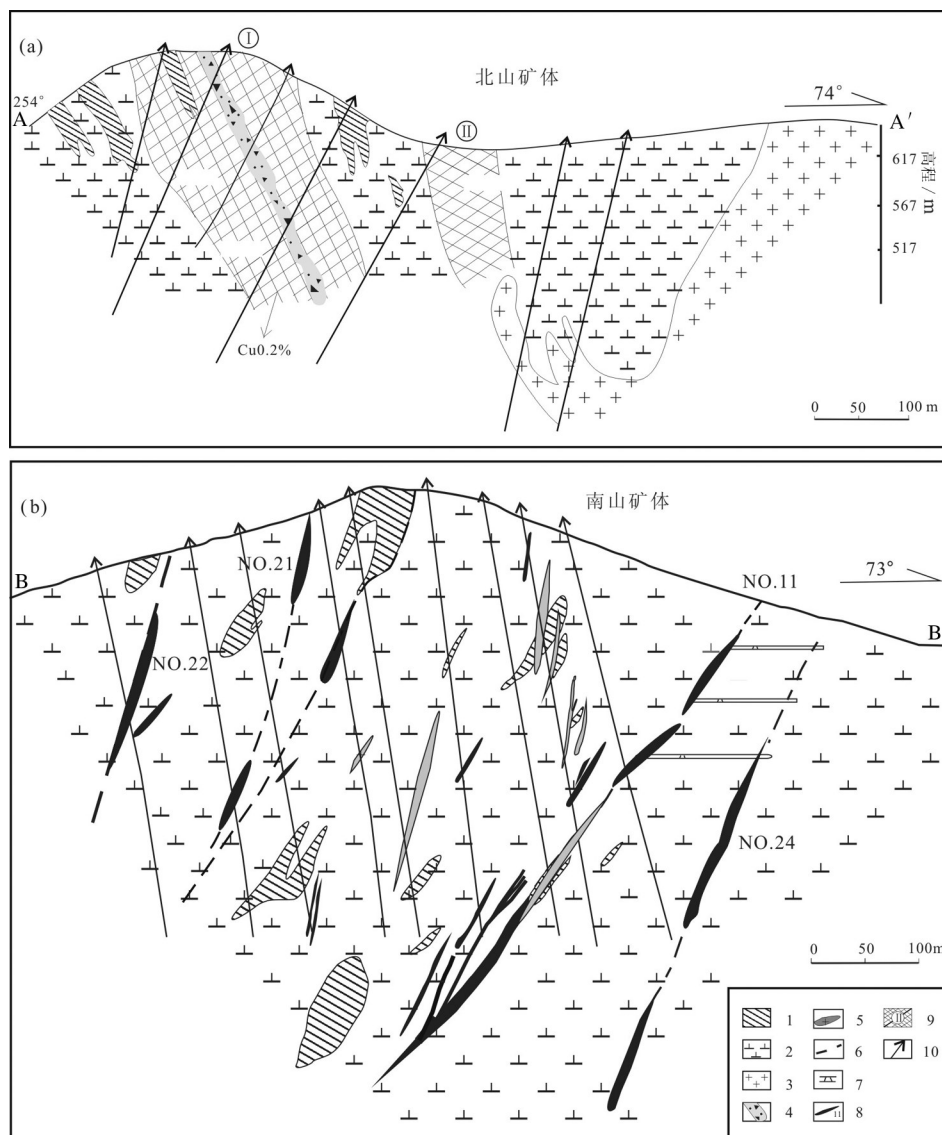


图3 小西南岔矿床南、北山矿体剖面图

a—北山矿段主要为 I、II 两个主要富矿带,围岩为五道沟群和闪长岩;b—南山矿段主要为脉状矿体,围岩主要为闪长岩;  
1—五道沟群;2—晚二叠闪长岩;3—早白垩世二长花岗岩;4—破碎蚀变带;5—闪长玢岩脉、英安斑岩脉;6—破碎带;7—坑道;8—矿脉及编号;  
9—矿带及编号;10—勘探线

Fig.3 Cross section through orebodies at the Xiaoxinancha deposit

a—The North mine mainly consisting of two ore-rich zones, and the orebodies delineated in terms of ore grade within the Wudaogou Group and diorite; b—The South mine occurring as veins hosted in diorite.  
1—Wudaogou Group; 2—Diorite in Late Permian; 3—Early Cretaceous monzogranite; 4—Altered fracture zone; 5—Diorite porphyrite or granodiorite porphyry; 6—Fracture zone; 7—Tunnel; 8—Ore vein and its serial number; 9—Ore zone and its serial number; 10—Exploration lines

主要形成石英、钾长石,黑云母,金属矿物为少量的浸染状磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿、黄铁矿,在北山矿段的花岗岩中出现浸染状辉钼矿,局部地段可见细脉状钼矿化。(II)浸染状硫化物或黄铁矿石英脉阶段:该阶段北山矿段主要发育碎裂状、浸染状硫化物(图4g、i),矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿(<5%),呈浸染状

产出在硅化、绿泥石化等蚀变岩中,少量产在团块状乳白色石英中;南山矿段此矿化阶段主要形成含磁黄铁矿黄铁矿石英脉。(III)纯硫化物或胶黄铁矿石英脉阶段:纯硫化物在南山矿段发育明显;北山矿段发育的硫化物脉主要为胶黄铁矿石英脉,在浸染状硫化物蚀变岩裂隙中形成,偶见残留的高温石

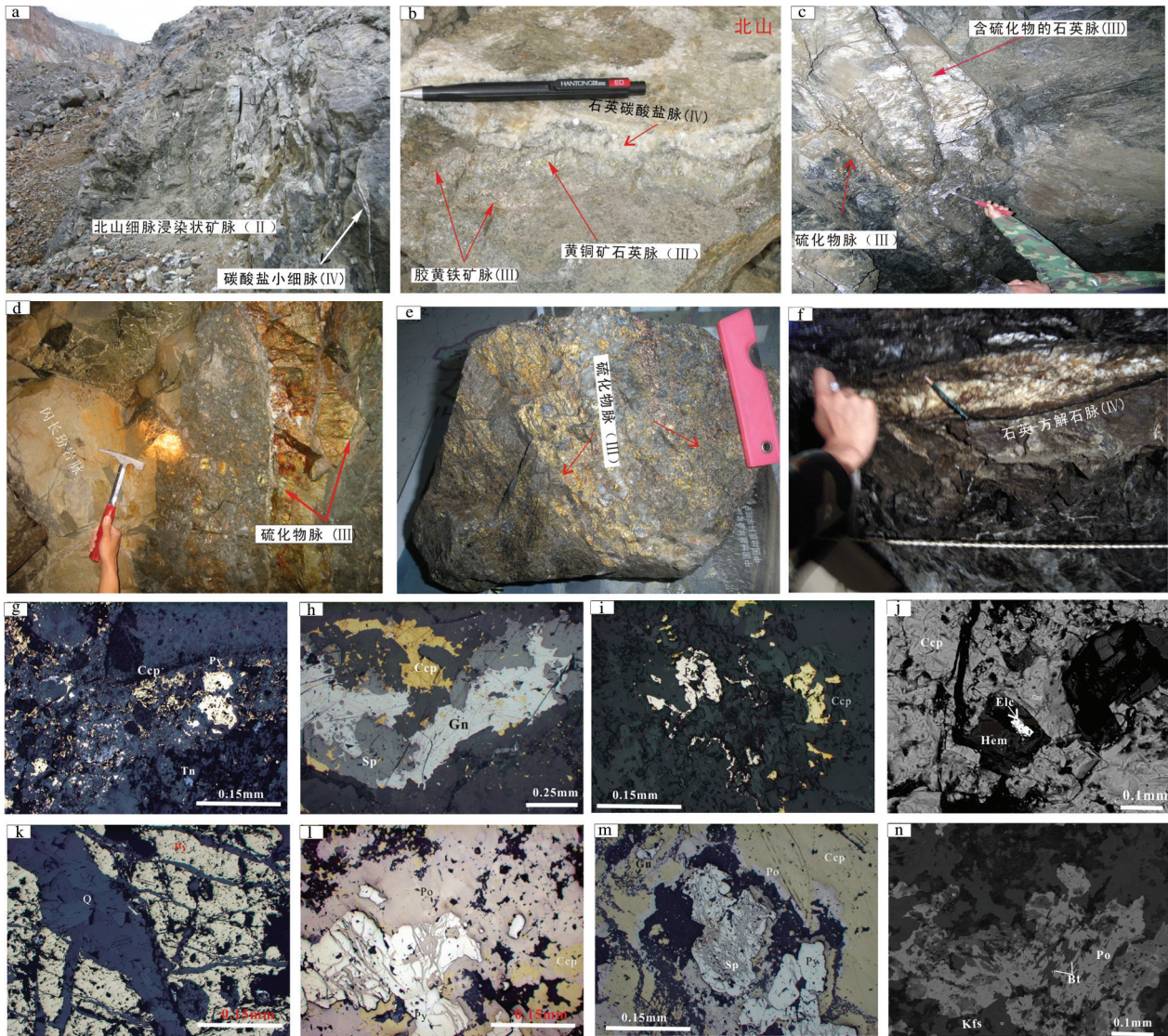


图4 小西南岔矿床矿体产状及矿石矿物组成、结构特征照片

a—北山细脉浸染状矿脉及晚期的石英方解石脉;b—北山脉状矿脉;c—南山硫化物脉和含硫化物的石英脉;d—南山硫化物脉及伴生的闪长玢岩;e—块状硫化物脉;f—石英方解石脉;g—北山矿段碎裂状黄铁矿、黄铜矿及砷黝铜矿;h—北山矿段少量黄铜矿与方铅矿、闪锌矿共生;i—北山矿段浸染状的黄铁矿与黄铜矿;j—北山赤铁矿中包裹着银金矿;k—黄铁矿被石英脉充填;l—南山矿段黄铜矿和磁黄铁矿共生并沿着裂隙充填早期黄铁矿;m—纯硫化物阶段闪锌矿交代早期黄铁矿,并与方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿共生;n—南山矿段磁黄铁矿中发育少量钾长石,黑云母;矿物缩写:Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Hem—赤铁矿;Po—磁黄铁矿;Ga—方铅矿;Sp—闪锌矿;Tn—砷黝铜矿;Elc—银金矿;Bt—黑云母;Kfs—钾长石

Fig.4 Photographs showing mode of occurrence and features of ore in the Xiaoxincha deposit

a- Veinlet-dissemination; b- Vein orebodies; (c) Sulfide quartz vein within diorite; (d) Sulfide veins coexistent with breccia, showing diorite porphyrite associated with mineralization; (e) Massive sulfide veins; (f) Quartz-calcite vein; g. Fragmented pyrite, chalcopyrite and tennantite; h- Paragenesis of polymetallic sulfides; i-Disseminated pyrite and chalcopyrite; j- Electrum inclusion in hematite; k. Pyrite cut by quartz veins; l. Pyrrhotite growing with chalcopyrite and filling fissures of pyrite; m. Minor galena and sphalerite aggregate in the pure sulfide stage (pyrite metasomatized by sphalerite); n.-Feldspathization and biotitization in rocks developing pyrrhotite. a, b, g-j from the North mine; c-f, k-n from the South mine. Abbreviations: Py- Pyrite; Ccp - Chalcopyrite; Hem - Hematite; Po- Pyrrhotite; Ga- Galena; Sp- Sphalerite; Tn-Tennantite; Elc-Electrum; Bt- Biotite; Kfs-K-feldspar

英。脉石矿物主要为呈脉状的灰白色的石英和绢云母,矿石矿物主要为磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿,少量方铅矿和闪锌矿(图4l~m),硫化物呈块状或团块状产出,是南山矿段的主要成矿阶段。(IV)石英-方解石阶段:主要形成方解石和石英脉,矿石矿物中可见少量黄铁矿(0.1%),南、北矿段均发育。

### 3 实验方法及样品

#### 3.1 流体包裹体研究

从不同类型和不同阶段的矿石样品中选择10个样品作切片准备流体包裹体研究。流体包裹体研究的测试样品主要来自I矿化阶段(II-517-5、Xn-6)、II矿化阶段(I-542-5、I-580-5、N11-1A)、III矿化阶段(I-580-6A-1、N1182)、IV矿化阶段(I-580-6A-2、XNC-N24-1)的典型标本中的乳白色、灰白色及灰色石英片,其中I-580、I-542和II-517分别采自小西南岔富金铜矿床北山矿区露天开采场的I号矿带580 m、542 m标高和II号矿带517 m标高,Xn-6、N11-1A、N1182和XNC-N24-1分别采自南山矿段钾化蚀变岩、井下11号脉6、8中段采掘面,24号脉6中段,以及矿田范围内与矿体伴生的似斑状角闪花岗闪长岩(Jxnc-2)。

流体包裹体的显微测温在吉林大学地球科学院“地质流体实验室”(LINKAMTHMS-600型冷热台(-196~600℃)完成,冷热台采用液氮制冷,电炉丝加热。接近于相变时的升温速率,对于完全均一温度为1℃/min,冰点为0.1℃/min。水成包裹体的盐度通过Bodnar(1993)的NaCl-H<sub>2</sub>O体系的数据获得。

矿石中单个流体包裹体的激光拉曼成分测试实验在南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室(Renishaw RM 2000型激光拉曼探针)完成,似斑状角闪花岗闪长岩石英中单个流体包裹体的激光拉曼测试在北京核工业地质分析测试研究中心(LABHR-VIS LabRAM HR 800型显微激光拉曼光谱仪)完成。Renishaw RM 2000型,实验条件为514nm Ar<sup>+</sup>激光器,光谱计数时间为10 s,每cm<sup>-1</sup>全波段一次取峰,激光束斑1 μm;LabRAM HR800型,波长为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。

矿物流体包裹体的氢氧同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学

实验室(北京)完成,实验仪器为MAT252气体质谱测试,δ<sup>18</sup>O和δD均以SMOW标准报出,流体中δD分析结果均优于5‰,δ<sup>18</sup>O分析结果优于2‰。矿物的δ<sup>18</sup>O分析过程为:(1)首先挑选不同矿化阶段的石英,然后研磨至200 μm,干燥后取样品10~30 μm;(2)于550~700℃与BrF<sub>5</sub>恒温反应获得氧气;(3)将纯化后的氧气与碳棒逐级反应生成的CO<sub>2</sub>送至质谱仪。石英矿物流体包裹体中氢同位素测试是通过真空热爆法打开包裹体,分离获得水;将获得的水与锌反应,获得可供质谱仪测试的氢气。

#### 3.2 Pb同位素研究

铅同位素分析均由北京核工业地质分析测试研究中心完成。

铅同位素的分析流程为:样品先用三酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后进行同位素测定,所用仪器为MAT-261质谱仪,分析精度对1 Lg铅含量其<sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb低于0.05%,<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb不大于0.005%。对国际标样NBS981的测试结果为:<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb=2.162189 ± 0.000027, <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb=0.913626 ± 0.000059, <sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb=0.059201±0.00015。

## 4 实验结果

#### 4.1 流体包裹体的岩相学

室温条件下,对矿床不同矿化阶段矿石和似斑状角闪花岗闪长岩石英内流体包裹体显微观察结果显示,流体包裹体划分为5类:气体包裹体(V)、液相包裹体(L)、含子晶多相的包裹体(S)、含CO<sub>2</sub>三相包裹体(C)和熔融包裹体(M)。

南山、北山矿段不同矿化阶段包裹体的类型和组合不同。南山矿段整个成矿阶段均以液体包裹体为主,III矿化阶段出现少量含CO<sub>2</sub>三相流体包裹体。北山矿段主要为气体包裹体、液相包裹体和含子晶多相的包裹体,明显特征是子晶矿物的种类和数量众多。似斑状角闪花岗闪长岩内流体包裹体主要为液体包裹体,还有气体包裹体、熔融包裹体、含金属矿物的多相包裹体。

##### 4.1.1 气体包裹体(V类)

该类包裹体包括室温下气液比大于50%的气液两相包裹体和纯气相包裹体(图5a),加热时均一为气相。主要在北山矿段发育,其形态呈椭圆形或不规则状,孤立或呈群带分布。该类型流体包裹体

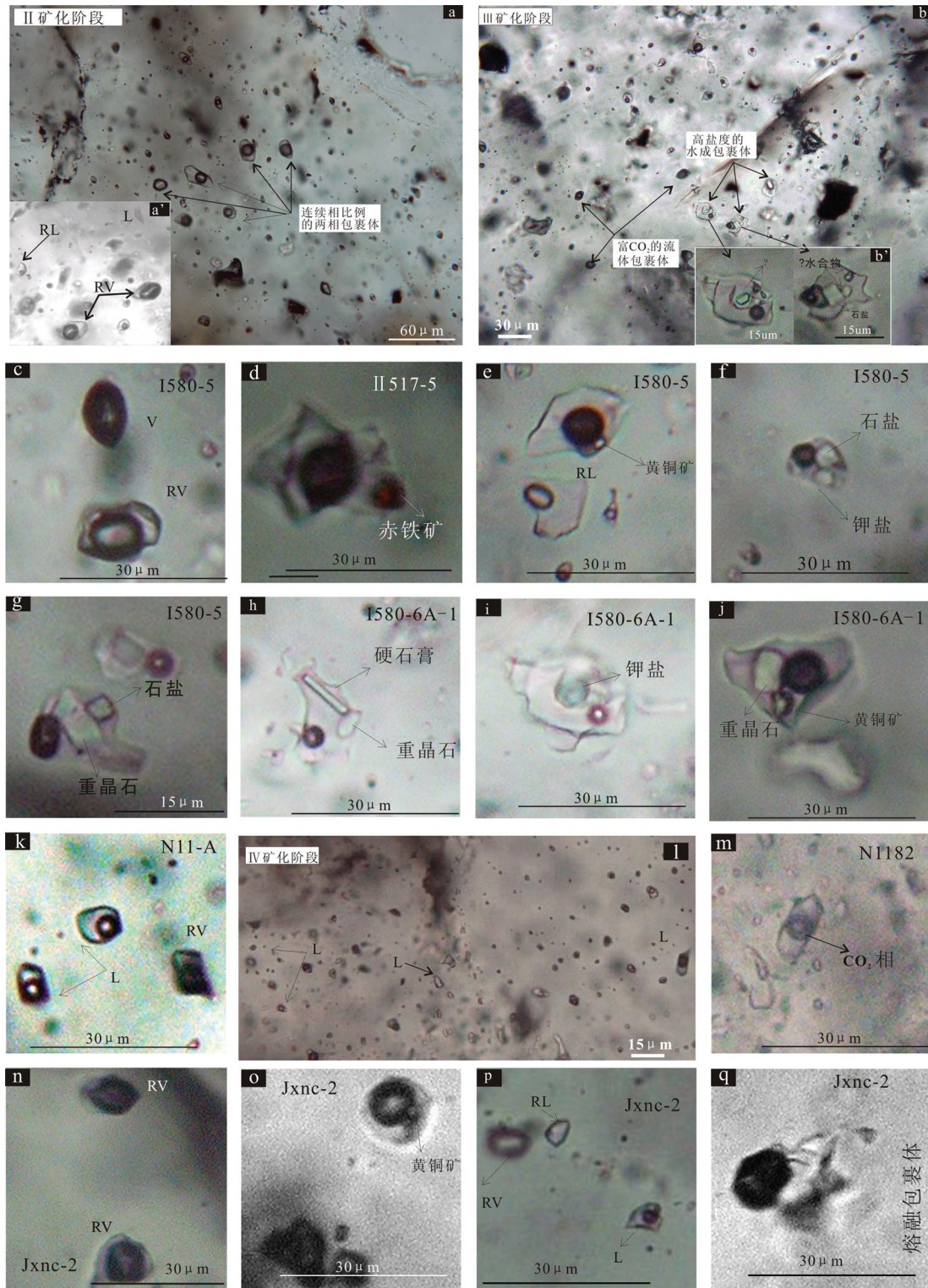


图5 小西南岔矿床流体包裹体显微特征图

(a~j, k~m, n~q 分别来自北山、南山矿段, 似斑状角闪花岗岩)

V—气体包裹体; RV—富气相包裹体; RL—富液相包裹体; L—液体包裹体

Fig.5 Photomicrographs of fluid inclusions of the Xiaoxinancha deposit

(a~j, k~m, n~q from the North mine, the South mine, and the hornblende-granodiorite, respectively)

V—Vapor fluid inclusion; RV—Vapor-rich two-phase inclusion; RL—Liquid-rich two-phase inclusion; L—Liquid fluid inclusion



大小在6~15  $\mu\text{m}$ ,富气相包裹体大小可达20  $\mu\text{m}$ ;似斑状角闪花岗闪长岩中还发育有富气相的两相包裹体,大小在15  $\mu\text{m}$ 左右。

#### 4.1.2 含子晶多相的包裹体(S类)

该类流体包裹体在I号矿带的580 m和II号矿带517 m标高发育,多与富气相包裹体共存或孤立分布(图5b),包裹体直径较大,粒径约20  $\mu\text{m}$ 。依据物相特征,可细分为气相+金属子晶矿物包裹体(Sa,子晶矿物为黄铜矿、赤铁矿等)(图5d,e)、气相+透明子晶矿物的包裹体(Sb,子晶矿物为石盐、或钾盐、或石膏、或重晶石或未知矿物)(图5f-i)和气相+透明子晶+金属子晶包裹体(Sc,图5j)。其中:石膏和重晶石多见于小西南岔富金铜矿床的北山矿段,它们呈长条、长板状( $d=6\pm\mu\text{m}$ )(图5g,h);黄铜矿子晶( $d=1\sim 2\mu\text{m}$ )在小西南岔富金铜矿床的北山矿段(图5e,j)以及似斑状角闪花岗闪长岩中均产出;赤铁矿子晶( $d=1\sim 2\mu\text{m}$ )仅北山矿段发育(图5d)。

与南山矿段、似斑状角闪花岗岩相比,北山矿段子矿物复杂多样,除了通过岩相学晶形特征及显微测温已确定出的子晶矿物类型外,还有方解石、硫酸盐、水合物以及其他的未知矿物(见后文拉曼测试结果)。

#### 4.1.3 液体包裹体(L类)

该类包裹体包括室温下气液比小于50%的气液两相包裹体和纯液相包裹体(图5k,l),加热时均一为液相。该类型南山矿段发育较多,气体充填度主要为10%~30%,大小为5~10  $\mu\text{m}$ ;似斑状角闪花岗闪长岩中该类包裹体大小为6~12  $\mu\text{m}$ ,气体充填度为5%~40%。

#### 4.1.4 含CO<sub>2</sub>三相包裹体(C类)

此类型的流体包裹体不发育,仅在南山11号矿脉中见到(图5m),形态为椭圆形,直径为12  $\mu\text{m}$ 左右,CO<sub>2</sub>相占总体积的20%~50%。实验获得CO<sub>2</sub>相有两种均一方式,或气相均一或液相均一。

#### 4.1.5 熔融包裹体(M类)

该类型包裹体在似斑状角闪花岗闪长岩发现(图5q),为孤立的原生包裹体,由气相+玻璃质±结晶质±黄铜矿组成,形态不规则,大小在20~30  $\mu\text{m}$ 。

### 4.2 显微测温结果

冷冻过程中南山、北山矿段均未见CO<sub>2</sub>笼形物出现,但南山矿段成矿晚阶段发现少量的室温下呈

现CO<sub>2</sub>三相的包裹体,初熔温度小于-56.6  $^{\circ}\text{C}$ ,CO<sub>2</sub>相部分均一温度16.7~29.1  $^{\circ}\text{C}$ ,完全均一温度220~280  $^{\circ}\text{C}$ 。气液两相包裹体的冰点,北山矿段为-0.2~-16.7  $^{\circ}\text{C}$ ,南山矿段为-0.2~-13.3  $^{\circ}\text{C}$ ;北山矿段含子矿物包裹体中子矿物的熔化温度为211.7~385.3  $^{\circ}\text{C}$ (表1)。

北山、南山矿段的样品测试过程共获得230余个单个流体包裹体的均一温度数据。综合南山、北山矿段获得整个矿床I~IV矿化阶段的均一温度(图6)。

北山矿段I矿化阶段流体包裹体的类型主要为富液相两相包裹体,其充填度为10%~45%,少量的富气相包裹体的充填度为60%,冰点为-6.7~-16.7  $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为10.1%~20% NaCl eqv。II矿化阶段流体包裹体的类型为富气相、富液相及含子矿物多相包裹体,富气相、富液相包裹体的充填度分别为60%~90%,10%~45%,冰点为-0.2~-30.4  $^{\circ}\text{C}$ ,含子矿物多相包裹体的石盐消失温度为226.9~385.3  $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为0.4%~45.5% NaCl eqv。III矿化阶段为富液相包裹体,少量的含子矿物多相包裹体,冰点为-1.1~-16.6  $^{\circ}\text{C}$ ,多相包裹体的石盐消失温度为211.7~305.4  $^{\circ}\text{C}$ ,III矿化阶段的盐度1.9%~38.2% NaCl eqv。II、III矿化阶段含子晶多相包裹体石盐子矿物早于或晚于或与气泡近同时均一(图7),具有明显的高盐流体和低盐流体共存的特征(图8a)。IV矿化阶段为富液相包裹体,冰点为-0.9~-2.5  $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为1.6%~4.2% NaCl eqv。

南山矿段I~IV矿化阶段主要为液体包裹体和少量气体包裹体,其盐度分别为4.0%~11.1% NaCl eqv、0.4%~17.2% NaCl eqv、1.6%~11.9% NaCl eqv、1.6%~4.8% NaCl eqv,成矿过程中,随着温度降低而盐度呈变小趋势(图8a)。南山III矿化阶段还发现少量含CO<sub>2</sub>的三相包裹体,其气体充填度为10%~35%,加热时均一温度为220~280  $^{\circ}\text{C}$ ,均一为液相。

图6显示,北山矿段主成矿阶段均一温度集中在300~390  $^{\circ}\text{C}$ ,南山矿段主成矿阶段的均一温度集中在260~330  $^{\circ}\text{C}$ ,对比来看南山矿段主成矿阶段均一温度、盐度相对低(图6),推测北山矿段可能发生了沸腾作用。

似斑状角闪花岗闪长岩流体包裹体类型主要为液体包裹体、少量的气体包裹体,均一温度范围

表1 小西南盆富金铜矿床流体包裹体显微测温综合分析表  
Table 1 Comprehensive analysis of fluid inclusions thermometry at the Xiaoxinancha gold-rich copper deposit

样品号	样品特征	矿化阶段	包裹体类型	大小/ $\mu\text{m}$	$T_{\text{m,ice}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{m,NaCl}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{m,total}}/^\circ\text{C}$	均一方式
I-517-5	硫化物 石英脉	北山I矿化阶段	L类	10~30,以14~20为主	-6.7~-16.7(19)		240~461.7(31)	包裹体以液相均一
I-542-5	硫化物 石英脉		L类	8~15,少量20~30	-0.2~-8.9(21)		306.3~388.9(24) 401.8(1)	包裹体以液相均一
I-580-5	乳白色 石英脉	北山II矿化阶段	L类、V类、Sb类	8~18,部分20~30	-0.9~-30.4(34)	226.9~385.3 (13)	246.8~395.4(50)	L类液相均一,少量的气相均一和临界均一; Sb包裹体多数以气泡后消失而均一
I-580-6A-1	暗色石英脉	北山III矿化阶段	L类、S类、V类	10~24,少量大于30	-1.1~-7.2(24) -12.9~-16.6(5)	211.7~305.4	150~305.4	L类以液相均一, Sb类有子矿物或气泡后消失两种均一方式
I-580-6A-2	石英方解石脉	北山IV矿化阶段	L类	10~20,部分24~30	-0.9~-2.5(7)		126.7~176.3(7)	L类的包裹体以液相均一
Xn-6	钾化蚀变岩	南山I矿化阶段	L类,少量的V类	10~15	-2.4~-11.3(7)		270.5~450(20)	液相均一, 气相均一
N11-1A	黄铜矿为主的硫化物 石英脉	南山II矿化阶段	L类	8~18,部分20~30	-0.2~-13.3(22)		180~374.9(41)	液相均一
N1182	灰色石英脉	南山III矿化阶段	L类, C类	6~12	-0.9~-8.2(15)		180~320.7(34)	L类液相均一; C类CO <sub>2</sub> 相存在液相或气相两种均一
N24-1	石英方解石脉	南山IV矿化阶段	L类	6~8	-0.9~-2(7)		150.4~206.7 (10)	液相均一
Ixnc-2	似斑状角闪花岗岩 长岩	岩浆热液过渡阶段	L类, V类M类	6~8	-3~-19.1(19)		114.3~467.7(50)	L类均一为液相, V类均一为气相

注:括号内数字为包裹体个数。

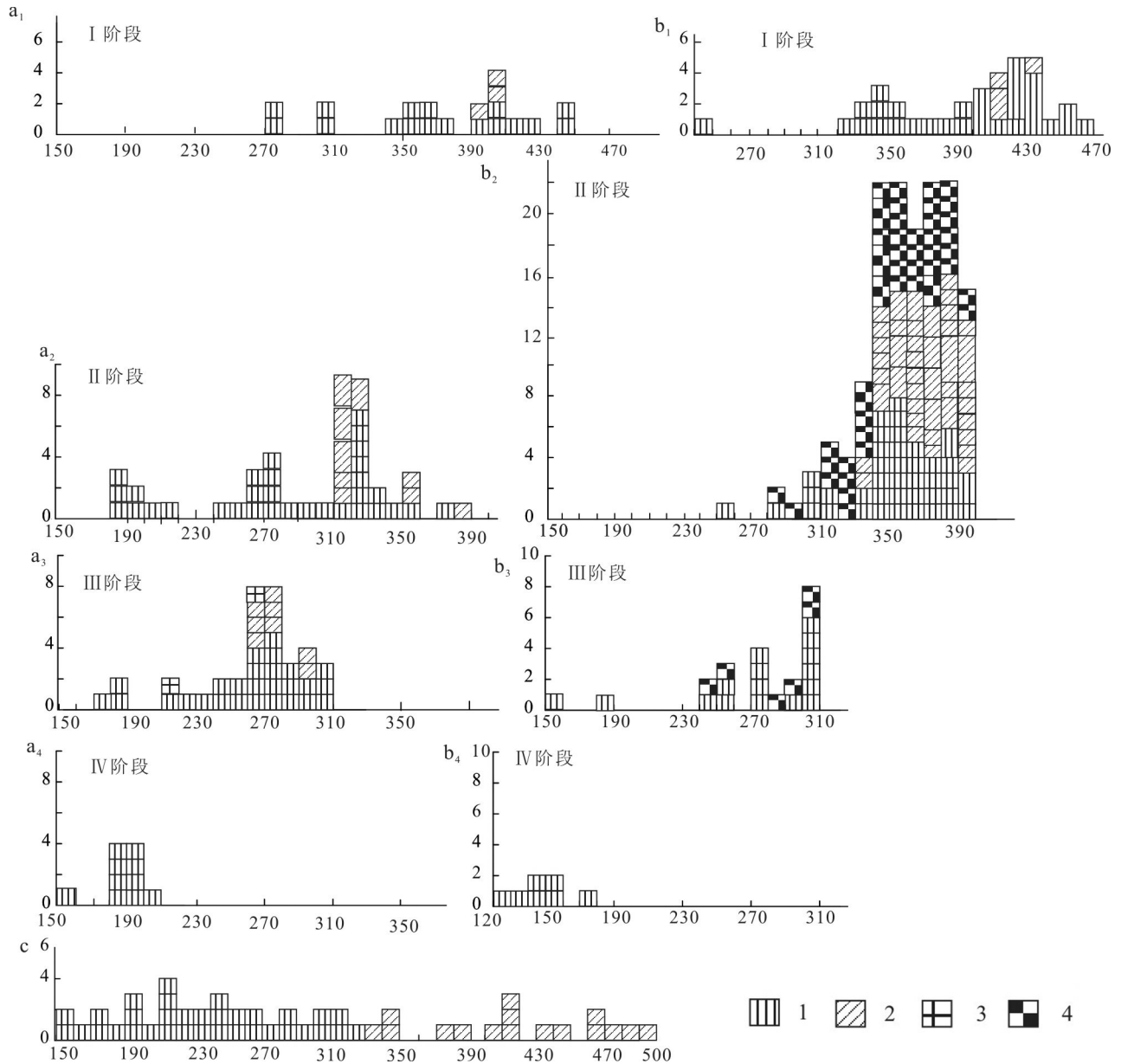


图6 小西南岔富金铜矿床流体包裹体的均一温度(°C)直方图

(a<sub>1</sub>~a<sub>4</sub> 来自南山; b<sub>1</sub>~b<sub>4</sub> 来自北山; c 为似斑状角闪花岗岩)

1—液体包裹体; 2—气体包裹体; 3—含CO<sub>2</sub>的三相包裹体; 4—含子晶矿物的多相包裹体

Fig.6 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions of the Xiaoxincha gold-copper deposit

(a<sub>1</sub>~a<sub>4</sub> from the North mine; b<sub>1</sub>~b<sub>4</sub> from the South mine; c—from hornblende-granodiorite)

1—Liquid-rich inclusion; 2—Vapor-rich inclusion; 3—CO<sub>2</sub>-bearing three phase inclusion; 4—Daughter mineral-bearing polyphase inclusion

为150~510°C,温度峰值不明显(图6c)。其中:在150~330°C的气液两相包裹体主要为液相包裹体;330~510°C为富气相的流体包裹体,气体充填度较高为60%~90%,它们与含黄铜矿的富气相、纯气相包裹体共存,其高温的富气相包裹体显示为临界包裹体。似斑状角闪花岗岩所代表的岩浆热液

期的含矿流体盐度为4.9%~11.5% NaCl eqv(图8b),与南山矿段早矿化阶段流体盐度范围基本一致,因此,与岩浆热液作用有关的初始含矿流体应是中低盐度的高温富含Cu元素的热流体。

图6b<sub>2</sub>、6b<sub>3</sub>和图8a显示北山矿段主成矿阶段从240~400°C都存在低盐和高盐的流体包裹体,说明

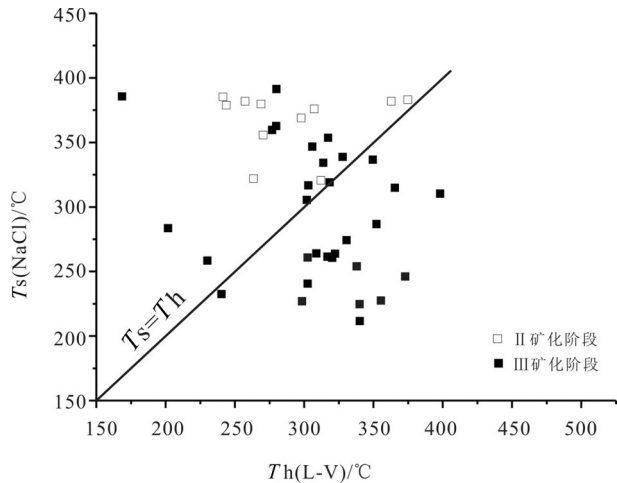


图7 小西南岔矿床含石盐子晶的流体包裹体气相消失均一对石盐消失均一图解 ( $T_{h(l-v)}=T_{s(NaCl)}$  线 源自 Shepherd et al., 1985)

Fig.7 Liquid-vapor homogenization temperature [ $T_{h(l-v)}$ ] versus halite dissolution temperature for halite-bearing fluid inclusion at the Xiaoxinancha deposit ( $T_{h(l-v)}=T_{s(NaCl)}$  line after Shepherd et al., 1985)

流体发生了沸腾作用 (Roedder, 1984), 且沸腾作用一直持续, 其中, 沸腾作用最强烈温度大约为 350°C。

### 4.3 矿物流体包裹体的气相成分

对小西南岔矿床矿石和似斑状角闪花岗闪长

岩中石英内不同矿化阶段的纯气相、含子晶多相和气液两相中的气相成分激光拉曼测试结果得出: 北山矿段主成矿阶段原生纯气相及含黄铜矿子矿物的单个流体包裹体的气体成分以  $H_2O$  和  $CO_2$  为主, 含少量的  $N_2$  和  $CH_4$  (图 9a, b), 晚阶段则是以  $H_2O$  为主, 少量  $CO_2$  (图 9c); 南山矿段的纯气相、含子矿物及气液两相包裹体均显示成矿阶段气体成分为  $CO_2$  和  $H_2O$ , 少量  $CH_4$  (图 9d~f); 蚀变似斑状角闪花岗闪长岩的原生包裹体的气相成分则是  $H_2$  与  $CO_2$ 、 $H_2O$  和  $N_2$  共存 (图 9g, h), 而  $N_2$  与  $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$  和  $CH_4$  共存 (图 9h~j), 即: 主要成分为  $CO_2$  和  $H_2O$ , 少量的  $H_2$ 、 $N_2$  和  $CH_4$ , 次生包裹体则是以  $CO_2$  和  $H_2O$  为主 (图 9k, l)。北山矿段多相流体包裹体中子晶的类型拉曼测试显示有黄铜矿、方解石、芒硝、硬石膏等 (图 9m~r)。

### 4.4 氢—氧同位素

本文测试了样品中石英、方解石中的氧同位素及其氢同位素组成, 样品的岩性及特征见表 2。根据公式  $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$  (Clayton et al., 1972)、 $1000\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 2.89$  和获得相应的石英中流体包裹体均一温度, 将石英、方解石中氧同位素换算为交换平衡的成矿流体中的氧同位素。结合前人资料, 初步得到南山矿段的石英、方解石中  $\delta^{18}O_{H_2O}$  值变化范围在  $-2.8\text{‰} \sim 6.1\text{‰}$ ,  $\delta D$  值为  $-130\text{‰}$

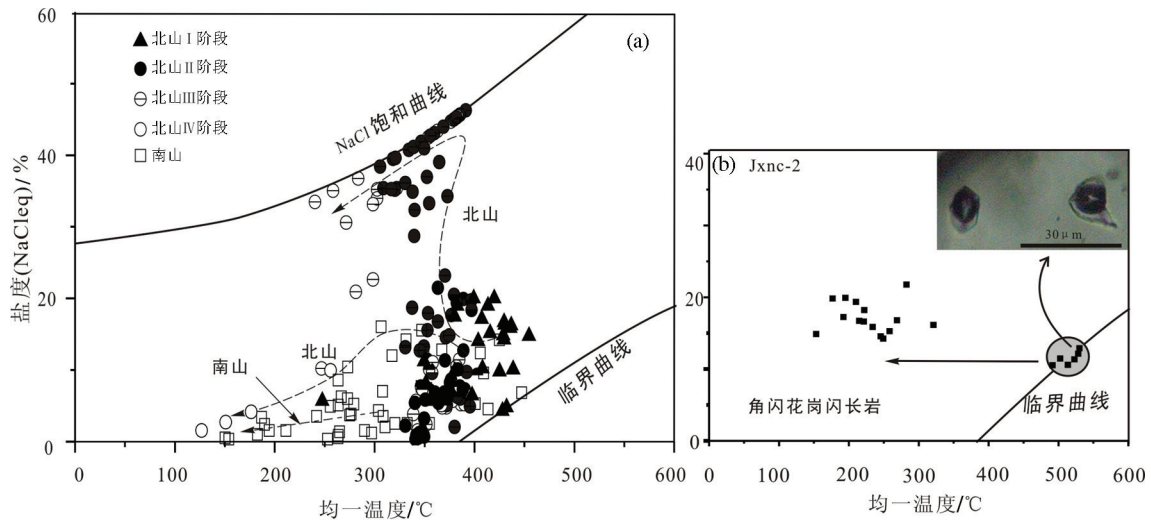


图8 小西南岔矿床石英内流体包裹体均一温度与盐度图解  
双箭头所连接的椭圆内的包裹体具有几乎相同的盐度范围, 代表成矿前流体

Fig.8 Salinity versus  $T_h$  (L-V) illustrating the distribution pattern data points relative to the NaCl saturation and critical curves from Ahmad and Rose (Ahmad et al., 1980)

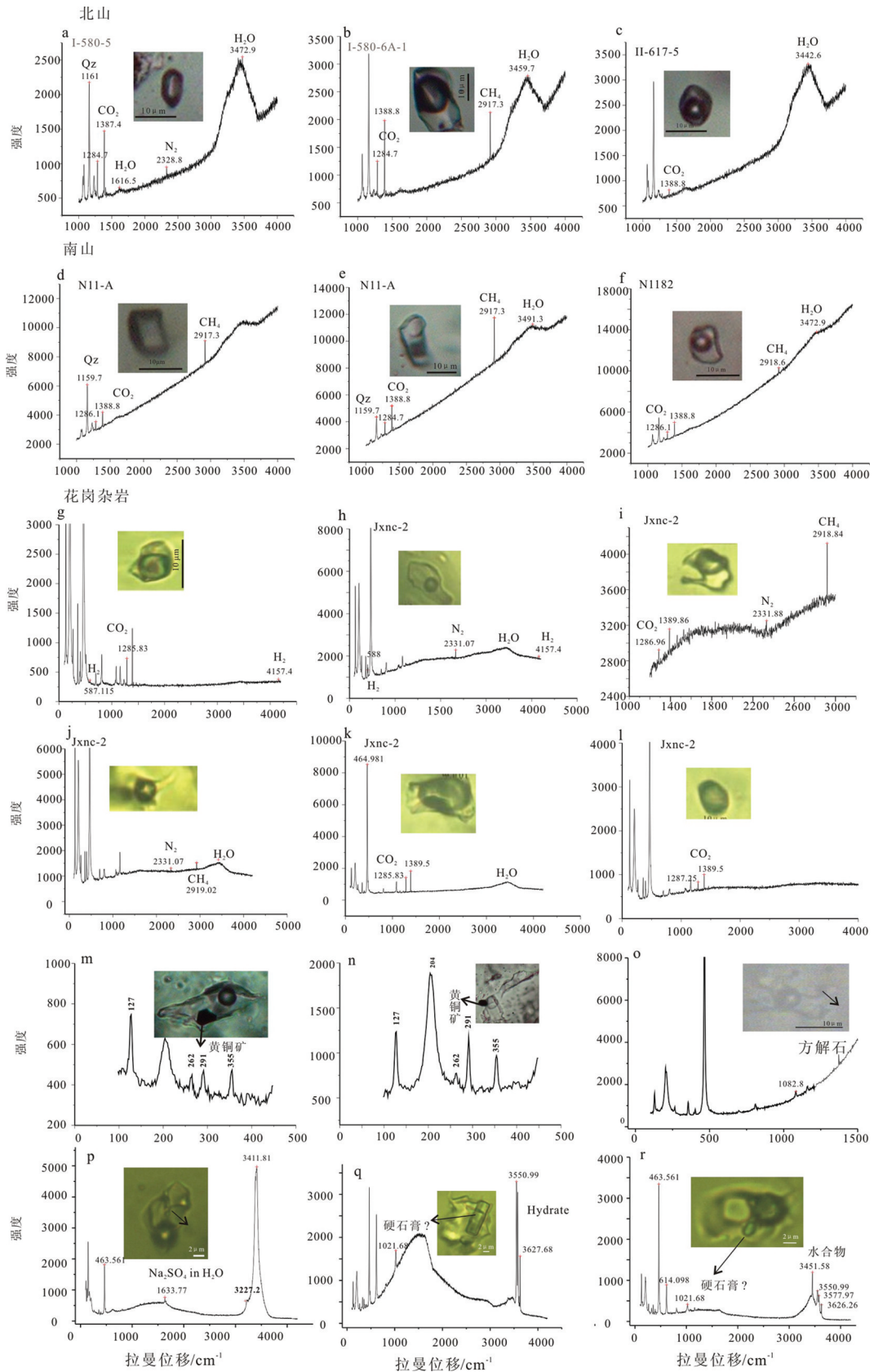


图9 小西南岔矿床典型流体包裹体的激光拉曼成分图

Fig.9 Result of Laser Raman analysis results of vapor and liquid phases in fluid inclusions of the Xiaoxinancha deposit

表2 小西南岔富金铜矿床流体包裹体内氢氧同位素成分特征

**Table 2 Compositions of oxygen and hydrogen isotopes of fluid inclusions from Xiaoxinancha gold-copper deposit**

采样地点	样品类型描述	样品号	测试样品	$\delta^{18}\text{O}$ /‰ (Q)	Th /°C	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ (H <sub>2</sub> O)	$\delta\text{D}$ v-SMOW/‰
24号脉	黄铜矿石英脉	XNC-N24-1	石英	7.01	250	-2.0	-100
11号脉5中段	乳白色石英脉	O-S <sub>2</sub> -6	石英			+3.3*	-61*
	磁黄铁矿石英脉	HV11-3	石英	10.9 <sup>#</sup>	370 <sup>#</sup>	+6.1	-61
南 11号脉7中段	黄铁矿石英脉	HV11-6	石英	8.6 <sup>#</sup>	273 <sup>#</sup>	+0.7	-55
山 24号脉2中段	黄铁矿石英脉	S21	石英	10.9 <sup>#</sup>	214 <sup>#</sup>	+0.1	-80
矿 24号脉3中段	黄铁矿石英脉	S13	石英	12.2 <sup>#</sup>	224 <sup>#</sup>	+1.9	-61
段 24号脉4中段	黄铜矿石英脉	HV24-3	石英	12.6 <sup>#</sup>	247 <sup>#</sup>	+3.5	-46
24号脉6中段	黄铜矿石英脉	S9	石英	11 <sup>#</sup>	291 <sup>#</sup>	+3.8	-77
	黄铜矿石英脉	S3	石英	13 <sup>#</sup>	255 <sup>#</sup>	+4.3	-66
24号脉6中段	石英方解石脉	XNC-N24-1	方解石	14.33	100	-2.8	-130
北 1号矿带580 m 山 标高 矿 620 m 标高 段 590 m 标高	灰色石英脉	XNC-I-580-6A-1	石英	5.92	400	+1.9	-83
	黄铁矿石英脉	O-N5-1	石英			-0.1	-82
	乳白色石英脉	O-N5-8	石英			+2.6	-76
	乳白色方解石脉	XNC-I-580-6A-2	方解石	0.91	170	-10.4	-92
	黄铜矿石英脉	HV 0-2	石英	9.8 <sup>#</sup>	326 <sup>#</sup>	+3.8	-73
	黄铜矿石英脉	HV 0-4	石英	9.5 <sup>#</sup>	269 <sup>#</sup>	+1.4	-69

注:标注\*的数据为引用吴尚全(1986);标注#数据来自李荫清(1995)。

~-46‰;北山矿段的石英、方解石中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为-10.4‰~+3.8‰,  $\delta\text{D}$ 值为-92‰~-38‰;花岗质杂岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为+6.50‰~+6.63‰,  $\delta\text{D}$ 值为-106‰~-110‰。相比之下,南山矿段的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 值偏高,主成矿阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 值接近岩浆水或长英质岩浆,磁黄铁矿石英脉中的数据点落在岩浆水区,成矿晚阶段演化则是以 $\delta\text{D}$ 明显降低或热液充填结晶作用特征(图10);北山矿段主成矿阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 接近岩浆水,向晚阶段演化则是以 $\delta^{18}\text{O}$ 降低明显或演化晚期具有地下水混入的演化特征(图10)。

4.5 Pb同位素

对小西南岔矿床南山、北山矿段矿石中黄铁矿等金属矿物进行了Pb同位素测试(表3)。北山 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的范围分别为18.3189~18.3770, 15.5660~15.590, 38.184~38.3131, 南山相应的Pb同位素比值分别为18.2275~18.3178, 15.5555~15.5612, 38.1318~38.2233,比北山略低。铅同位素构造模式图(图11a)上显示北山数据点落在了下地壳范围内,南山落在下地壳与MORB的交线上,图11b显示南山落在了造山带的线上,北山的数据有偏向下地壳和上地壳的倾向,说明南山、北山矿段成矿物质基本为同源的,显示壳幔混合的特征。

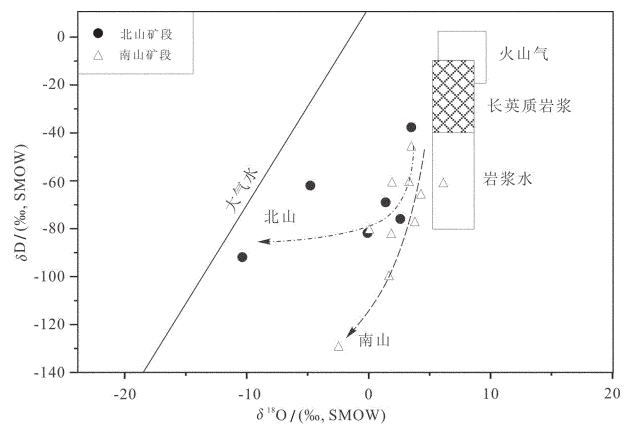


图10 小西南岔矿床矿物中 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解  
Fig.10 Oxygen and hydrogen isotope compositions of water in equilibrium with hydrothermal minerals from the Xiaoxinancha deposit

5 讨论

5.1 成矿流体组成与起源

近年来,随着对斑岩型(金)铜矿床的研究使得人们更倾向于中高温岩浆热液(铜)金矿床的早期成矿流体为高盐度流体(Ulrich et al., 2001)。但是,典型岩浆流体的盐度为+5%~+10% NaCl eqv (Burnham et al.,1979; Cline et al., 1994; Hedenquist

表3 小西南岔矿床硫化物普通铅同位素组成  
Table 3 The Pb isotope Composition of sulfides from the Xiaoxinancha deposit

采样地点	样品号	样品名称	实验样品	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	
				比值	$2\sigma$	比值	$2\sigma$	比值	$2\sigma$
南山矿段	Jxnc-N24-1	纯硫化物矿脉	黄铜矿	18.3178	9	15.5612	8	38.2233	12
	Jxnc-N11-3a	硫化物石英脉	黄铜矿	18.2275	7	15.5555	7	38.1318	19
	JxncI-580-6-1a	胶黄铁矿石英脉	胶黄铁矿	18.3189	31	15.5934	29	38.3131	74
JxncI-580-6-1b	黄铁矿		18.3213	5	15.5660	4	38.2491	13	
	JxncI-580-5	黄铁矿石英脉	黄铁矿	18.3770	16	15.590	22	38.184	26

et al., 1994; 何鹏等, 2013; 解洪晶等, 2016), 并且一些中高温岩浆热液矿床和斑岩型铜矿床深部流体包裹体研究结果显示初始岩浆热流体为中等密度的盐度小于 12% NaCl eqv 的 单相流体 (Redmond et al., 2004; Rusk et al., 2004, 2008; 李文昌等, 2011), 因而中高温岩浆热液(铜)金矿床的初始成矿流体可能是高盐热流体, 也可能是低盐度岩浆热流体。

流体包裹体的测温结果表明, 小西南岔富金铜矿床 I 矿化阶段流体包裹体的均一温度大于 400°C, 计算获得南山矿段 I 矿化阶段的流体包裹体盐度为 4.0%~11.1% NaCl eqv, 接近临界流体(图 8a)。与成矿同期的似斑状角闪花岗闪长岩的富气相的流体包裹体的均一温度在 400°C~530°C, 盐度为 4.9%~11.5% NaCl eqv。流体包裹体内发现了石膏、赤铁矿等矿物, 因此表明小西南岔富金铜矿床初始含矿流体为低盐度的高温高氧化的岩浆热流体。

流体包裹体的气相和子晶成分一定程度上反映了成矿流体的组成。本文南山、北山矿段的流体包裹体的气体成分均以  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  为主, 含少量的  $\text{CH}_4$ , 但北山还含有少量  $\text{N}_2$ (图 9a、b)。因此, 南、北

矿段捕获的流体均为具有 C-H-O 体系的岩浆热流体体系(刘丛强等, 2001; Giggenbach et al., 1997; Lowenstern, 2001)。北山矿段捕获的含子晶多相包裹体的子晶种类有石盐、钾盐、石膏、重晶石和黄铜矿、赤铁矿以及硫酸盐、水合物和方解石等, 流体包裹体子晶的种类表明, 北山矿段比南山矿段应有更复杂的流体组成。矿石中 Pb 同位素表明南山、北山矿段的成矿物质均为壳幔混合(图 11)。

氢、氧同位素组成表明南山、北山矿段的早矿化阶段的流体接近初始岩浆水或长英质岩浆(图 10)。孙景贵等(2007)对小西南岔富金铜矿床矿物流体包裹的稀有气体同位素研究表明, 南山矿段流体可能有来自地幔/软流圈流体的参与(图 12a、b), 而北山矿段的流体具有与南山同源的幔源流体受到地壳流体强烈混合作用的特征(图 12c、d), 而这地壳流体的加入可能导致了北山矿段出现复杂的子晶矿物。

似斑状角闪花岗闪长岩石英斑晶中流体包裹体含有  $\text{H}_2$ , 解释可能为岩石圈地幔遭受古太平洋俯冲板片提供流体交代所致(张铭杰等, 2008), 这种推

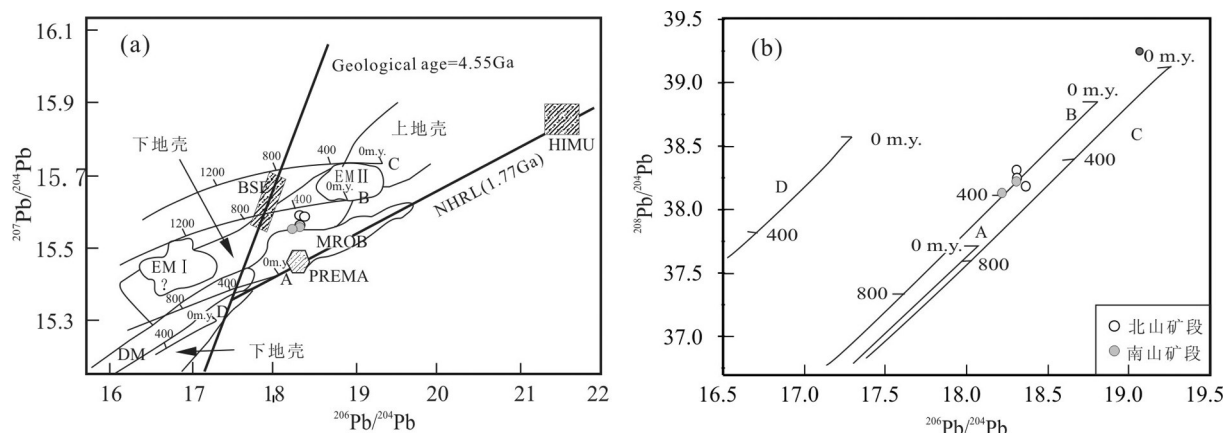


图 11 小西南岔矿床 Pb 同位素构造模式(底图据 Zartman et al., 1981)

Fig.11 Plumbotectonic model for the Xiaoxinancha deposit (after Zartman et al., 1981)

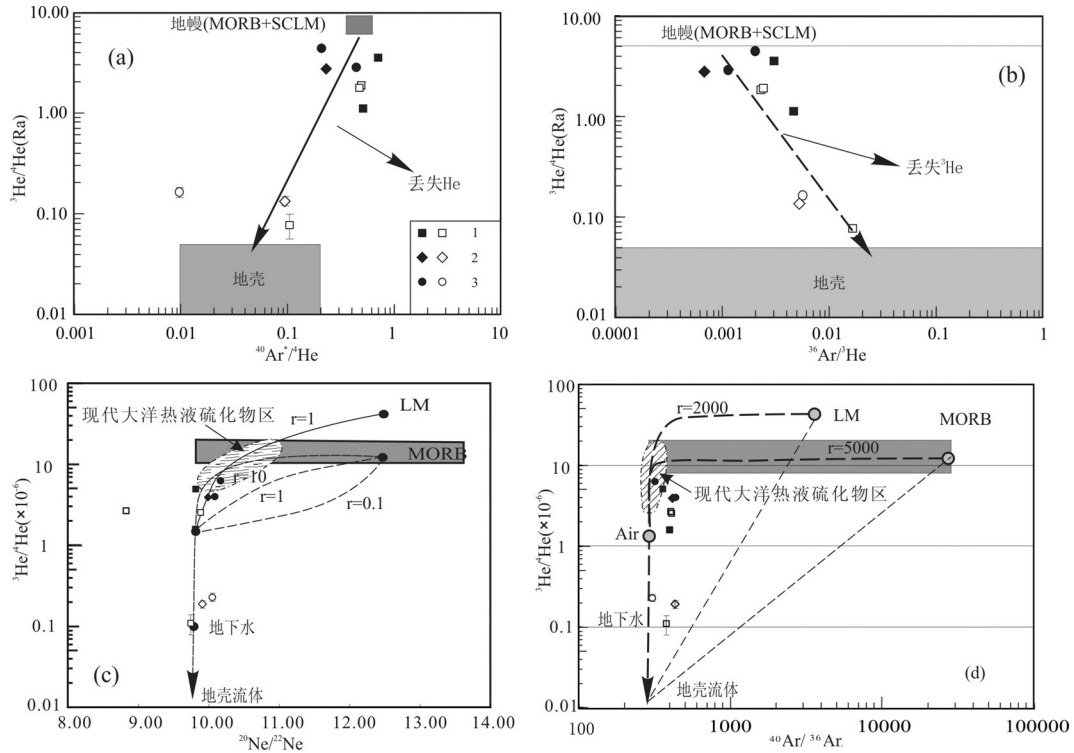


图 12 流体包裹体的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^3\text{He}/^4\text{He}$ (a),  $^{36}\text{Ar}/^{36}\text{He}-^3\text{He}/^4\text{He}$ (b),  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}-^3\text{He}/^4\text{He}$  (c)和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^3\text{He}/^4\text{He}$  (d)图解(孙景贵等,2007)

1—黄铁矿; 2—磁黄铁矿; 3—黄铜矿; 空心图例代表北山, 实心图例表示南山  
c,d 图解显示了流体的混合模型, 假定 MORB 源区的上、下地幔的值如下:  $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{UM}}=12.5$ ,  $(\text{R}/\text{Ra})_{\text{UM}}=8.8$ ,  $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{LM}}=12.5$ ,  $(\text{R}/\text{Ra})_{\text{LM}}=30$ ;  $r=(^{22}\text{Ne}/^4\text{He})_{\text{A}}/(^{22}\text{Ne}/^4\text{He})_{\text{UM/LM}}$ , 且  $r$  范围为 0.1 ~ 10

Fig.12 Diagrams of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios vs.  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (a),  $^3\text{He}/^4\text{He}$  vs.  $^{36}\text{Ar}/^{36}\text{He}$  ratios (b),  $^3\text{He}/^4\text{He}$  vs.  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  (c) and vs.  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (d) (after Sun et al., 2007)

1—Pyrite; 2—Pyrrhotite; 3—Chalcopyrite; hollow graphs represent the North mine; solid graphs represent the South mine;

Fig.12c and Fig.12d show the binary mixing model in the fluid inclusions. Assuming that the upper mantle (UM) and the lower mantle (LM) of the MORB source region have  $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{UM}}=12.5$ ,  $(\text{R}/\text{Ra})_{\text{UM}}=8.8$  and  $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{LM}}=12.5$ ,  $(\text{R}/\text{Ra})_{\text{LM}}=30$ , respectively;  $r=(^{22}\text{Ne}/^4\text{He})_{\text{A}}/(^{22}\text{Ne}/^4\text{He})_{\text{UM/LM}}$ , and  $r$  ranges from 0.1 to 10

测与矿石矿物、闪长玢岩、花岗杂岩(似斑状角闪花岗闪长岩岩浆、黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩)的 Sr-Nd-Pb 同位素结果所反映的岩浆源区和性质基本一致(Men et al., 2011)。

### 5.2 含矿流体沉淀机制

流体不混溶或沸腾作用已被证明是许多大型富金斑岩铜矿床甚至是中高温热液铜金矿床形成的主要机制(Rodder,1971)。不混溶作用通过一定程度的减压和降温过程可以发生;而沸腾作用则是通过减压和升温过程产生。按照 Ramboz et al.(1982)提出的不混溶标准,本文研究的小西南岔富金铜矿床北山矿段在成矿过程中发生了流体沸腾作用,成矿晚阶段南山矿段可能也发生了局部的流体不混溶作用,主要依据概括为:(1)北山矿段纯气相、连续

不同气液比的气液两相包裹体共存(图 5a),含子晶的高盐与富含  $\text{CO}_2$  包裹体共存(图 5b);(2)北山矿段同一视域内,水成包裹体存在三种均一方式,即以液相均一为主、少量的气相均一和临界均一,且具有相似的均一温度(图 5a', a);(3)相同的均一温度范围内(350~390°C),盐度差别很大(图 8)(Roedder, 1984);(4)流体包裹体拉曼测试显示气相中含有较高的  $\text{CO}_2$ (图 9a, b)和方解石子晶矿物(图 9o),成矿热液中富  $\text{H}_2\text{O}$  和贫  $\text{CO}_2$  端元共存,具有  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  流体体系分离而来的特征;(5)初始成矿流体的盐度为介于沸腾引起的高盐度与低盐度成矿流体之间(图 8a)。

显微测温结果显示主成矿阶段北山矿段比南山矿段温度高,而同位素结果表明南山、北山矿段成矿

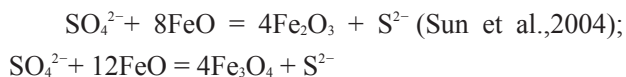


流体是同源的,但北山矿段成矿流体中有地壳流体的混入,因此推测北山矿段沸腾作用后,成矿流体与地壳流体发生了混合。南山矿段灰色石英脉中(N1182)存在少量的均一温度为220~280℃的含CO<sub>2</sub>三相流体包裹体且野外发现角砾状硫化物石英脉,暗含流体发生了相的分离,但尚未发现更多的不混溶作用特征,可能不混溶作用发生在局部。

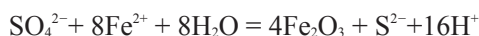
### 5.3 含矿流体演化与矿体的形成

从理论上讲,岩浆热液流体演化成矿过程多种因素导致成矿物质的结晶沉淀,如:流体沸腾,水岩反应,流体冷却,压力降低以及外界流体的加入等。就小西南岔矿床而言,沸腾作用是导致北山矿段形成浸染状矿体主要机制;南山矿段的硫化物石英脉和纯硫化物脉形成过程应是幔源的含矿流体,伴随温度、压力降低,以充填结晶作用为主形成脉状矿体。

前文显示初始流体为高温高氧化低盐度的岩浆热流体,在流体包裹体的岩相学和矿石矿物的显微观察中都发现了磁铁矿和赤铁矿,说明早期矿化时的氧逸度高于 $\Delta\text{FMQ}+2$ ,甚至到了约 $\Delta\text{FMQ}+4$ ,这与世界范围内斑岩型铜矿的高氧逸度一致(Sun et al., 2013)。因此岩浆中的硫是以硫酸盐的形式存在,如我们在本矿床发现了石膏、重晶石等,那么硫如何从硫酸盐转化为成矿阶段的硫化物的呢?在岩浆演化过程中降低氧逸度原则上有以下几种方法(Sun et al., 2015, 2017):①氧化气体(CO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>)的去气作用;②还原的围岩的同化作用;③硫酸盐被其他元素还原,如磁铁矿甚至赤铁矿的结晶。本文流体包裹体的岩相学和激光拉曼成分测试表明南山矿段成矿流体从早期高氧化转变为还原流体的机制主要为磁铁矿和赤铁矿的结晶,北山矿段可能还有去气作用和围岩的同化作用。具体反应方程式如下:



在成矿热液中还可以形成热液赤铁矿,如流体包裹体内发现了赤铁矿,反应式应为如下:



因此所有硫酸盐的还原作用产生了S<sup>2-</sup>,而热液赤铁矿的形成降低了pH值,因此形成黄铁矿、黄铜矿等硫化物。

结合矿床地质特征,初步确立成矿过程含矿流

体演化,南山、北山矿段I、II阶段成矿过程流体演化不同,III阶段、IV阶段基本相同,具体如下:

#### 5.3.1 南山矿段

I阶段:含矿流体库形成后,区域发生张扭性断裂作用(小西南岔断裂),幔源低盐度的高温高氧化含矿流体沿着断裂上升,伴随着以钾长石,黑云母,磁铁矿等矿物的结晶作用,流体开始向还原流体转变,少量自形的黄铁矿形成,南山矿段形成石英-贫硫化物脉。

II阶段:含矿流体上升,贯入到南山矿段晚二叠世闪长岩中的断裂中,伴随围岩的同化作用,成矿流体的还原性增加,流体结晶充填形成磁黄铁石英脉、含黄铁矿的磁黄铁矿黄铜矿石英脉。

#### 5.3.2 北山矿段

I阶段:幔源的低盐度高温热液含矿流体库形成后,由于减压发生沸腾作用(Marianne et al., 2005),而后与五道沟群内的地壳流体混合,流体转变为中等盐度的弱还原流体,在花岗岩裂隙中首先少量的辉钼矿呈浸染状、团块状,或细脉状产出。

II阶段:沸腾作用持续进行,到350℃±,沸腾作用最强,压力持续降低,含矿流体中黄铁矿、磁黄铁矿,黄铜矿及自然金开始结晶沉淀,伴随流体与围岩不断反应,流体的还原性增强,北山矿段形成浸染状黄铁矿、细脉状黄铁矿黄铜矿脉低品位(Cu为0.21%,Au为0.97×10<sup>-6</sup>)富金铜矿体。

#### 5.3.3 南山、北山矿段

III阶段:流体上升到近地表,大气水在南山、北山矿段加入,可能引发局部不混溶作用,胶黄铁矿、银金矿、方铅矿、闪锌矿等形成,北山矿段因此在细脉浸染状矿体裂隙中充填形成石英脉以及胶黄铁石英脉,南山矿段因此而形成的富矿流体在原来硫化物脉的基础上沉淀成高品位(Cu=7.8%,Au=4.58×10<sup>-6</sup>)纯硫化物脉的富金铜矿体。

IV阶段:南、北山矿段的含矿流体演化晚期,成矿元素几乎全部沉淀,在南、北山矿段分别沉淀结晶形成石英方解石脉,标志整个成矿过程的结束。

## 6 结 论

本文通过对延边小西南岔富金铜矿床和同期似斑状角闪花岗岩闪长岩的矿物流体包裹体和氢氧同位素、Pb同位素的系统研究,结合稀有气体同位

素研究成果初步得到如下几点结论:

(1)小西南岔富金铜矿床为中高温岩浆热液富金细脉浸染型与硫化物石英脉复合型铜矿床,非典型的斑岩型铜矿床。

(2)小西南岔矿床初始含矿流体的温度为400~470℃,盐度4.0%~11.1% NaCl eqv,气体成分为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O,少量的N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>,流体包裹体内子晶矿物发育石膏,赤铁矿等,与似斑状角闪花岗岩闪长岩内流体包裹体的特征基本一致,为高温高氧化的岩浆热流体。

(3)南山、北山矿段初始含矿流体与地幔活动有关,但北山矿段早阶段成矿流体有地壳流体的混入。

(4)北山矿段早阶段成矿流体盐度、主成矿阶段均一温度均比南山矿段略高,成矿过程中盐度变化大,两个矿段成矿机制不同:北山矿段细脉浸染型的矿体是中高温的低盐度幔源流体由于减压发生沸腾作用,之后进入五道沟群的裂隙中与地壳流体发生混合作用,以交代方式成矿;而南山矿段脉状矿体则是中高温低盐度成矿流体贯入晚二叠世闪长岩中的断裂中,伴随成矿流体的温度、压力降低,流体以充填作用为主结晶、沉淀作用形成。成矿中晚阶段大气水的加入,引发的局部不混溶作用导致分别在北、南山裂隙中形成胶黄铁石英脉和纯硫化物脉。

**致谢:**笔者在流体包裹体测温 and 成分测定过程中,得到吉林大学地球科学学院地质流体实验室王力老师和北京核工业地质研究所张敏研究员的大力协助;在论文修改过程中,得到评审专家所提出的宝贵意见,在此,一并表示衷心的感谢!

## References

Ahmad S N, Rose A W. 1980. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico [J]. *Economic Geology*, 75, 229–250.

Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O–NaCl solutions[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 683–684.

Burnham C W. 1979. Magmas and hydrothermal fluids // Barnes H L (ed.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd edn. Wiley, New York, 71–136.

Clayton R N, O'Neil J R, Mayed T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*[J]. 77, 3057–3067.

Cline J S and Bodnar R J. 1994. Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, molybdenum deposit[J]. *Econ. Geol.*, 89: 1780–1802.

Giggenbach W F. 1997. The origin and evolution of fluids in magmatic–hydrothermal systems // (Barnes H L ed. ). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley, New York, 737–796.

He Peng, Yan Guangsheng, Zhu Xinyou, Zhang Zhongyi, Wang Yanli, Cheng Xiyin, Li Yongsheng, Zhen Shimin, Du Zezhong, Jia Delong, Gong Xiaodong. 2013. Fluid inclusion study of the Saishitang Cu deposit in Qinghai [J]. *Geology in China*, 40(2): 580–593 (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(6490): 519–527.

Jin Ke. 2003. Petrology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Yanbian Area: Constraints on Transformation of Tectonic System and Composition of Lithosphere [D]. Changchun: Jilin University, (in Chinese with English abstract).

Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pusheng, Yin Guanghou. 2011. The Characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province [J]. *Geology in China*, 38(2): 403–414(in Chinese with English abstract).

Li Yinqing, Chen Dianfen. 1995. A study of fluid inclusions and ore-forming process of the Xiaoxinancha gold–copper deposit, Jilin Province [J]. *Mineral Deposits*, 14(2) 151–156(in Chinese with English abstract).

Liu Chongqiang, Huang Zhilong, Li Heping, Su Genli. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes [J]. *Earth Science Frontiers China University of Geosciences (Beijing)*, (8): 231–243(in Chinese with English abstract).

Lowenstern J B. 2001. Carbon dioxide in magma and implications for hydrothermal systems [J]. *Mineralium Deposita*, 36, 490–502.

Marianne R, Landtwing, Thomas Pettke. 2005. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic–hydromal fluids: the Bingham porphyry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 229–243.

Men Lanjing, Sun Jinggui, Zhang Zengjie, Li Yixin, Xing Shuwen, Cui Peilong. 2011. An isotopic (Sr, Nd and Pb) tracer study on Xiaoxinancha gold–rich copper deposit in Yanbian, China: implication for the geodynamic model of diagenesis and metallogenesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85: 175–188.

Meng Qingli, Zhou Yongchang, Chai Sheli. 2001. Porphyry–hydrothermal Copper–Gold deposits in East Yanbian, China [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 33–82 (in Chinese).

Ramboz C, Pichavant M, Weisbrod A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data in terms of immiscibility [J]. *Chemical Geology*, 37: 29–46.

- Redmond P, Einaudi M T, Inan E E, Landtwing M R, Heinrich C A. 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: new insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah [J]. *Geology*, 32: 217-220.
- Ren Yunsheng, Wang Hui, Qu Wenjun. 2011. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from Xiaoxinancha Copper-Gold Deposit in the Yanbian Area and Its Geological Significance [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(4): 721-728(in Chinese with English abstract).
- Rodder E. 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado [J]. *Economic Geology*, 66: 98-120.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy and Geochemistry [J]. *Mineralogical Society of America*, 12: 1-664.
- Rui Zongyao, Zhang Hongtao, Wang Longsheng. 1995. Porphyry-hydrothermal Copper-Gold deposits in Yanbian area, Jilin Province [J]. *Mineral Deposits*, 14(2): 99-114(in Chinese with English abstract).
- Rusk B G, Reed M, Dilles J H. 2004. Composition of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper molybdenum deposit at Butte, MT [J]. *Chem. Geol.*, 210:173-199.
- Rusk B G, Reed M, Dilles J H. 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit, Butte, Montana [J]. *Econ. Geol.*, 103:307-334.
- Shepherd T, Rankin A H, Alderton D H M. 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies [M]. London: Blackie, 239.
- Sun Chao. 1994. Study on Isotope geology of Xiaoxinancha gold-copper deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 8(2): 119-123 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Men Lanjing, Zhao Junkang. 2008a. Zircon chronology of melanocratic dykes in the district of the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4):517-527(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Chen Lei, Zhao Junkang. 2008b. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in Xiaoxinancha gold-rich copper orefield of Yanbian and its geological implications [J]. *Mineral Deposit*, 27(3): 319-328 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Men Lanjing, Chen Dong. 2009. Constraints of magmatism on the ore-forming process of magmatic hydrothermal gold-rich copper deposits as recorded from the element geochemistry and zircon CL image features: A case study of the Xiaoxinancha gold-rich copper deposit, Yanbian, Jilin Province [J]. *Mineral Petro.*, 29(3): 43-52(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Xing Shuweng, Zheng Qingdao. 2006. Geology and Geochemistry of Nonferrous and Noble Metal Deposits, Northeastern China [M]. Changchun: Jilin University Publishing House, 1-128 (in Chinese).
- Sun Jinggui, Zhao Junkang, Chen Junqiang. 2008. Ore-forming mechanism for the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian, Jilin Province, China: Evidence from noble gas isotope geochemistry of fluid inclusions in minerals [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 51: 1-13(in Chinese with English abstract).
- Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization [J]. *Nature*, 431 (7011), 975-978.
- Sun W D, Huang R F, Li H. 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas [J]. *Ore Geol. Rev.*, 65:97-131.
- Sun W D, Liang H Y, Ling M X. 2013. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 103, 263-275.
- Sun W D, Wang J T, Zhang L P. 2017. The formation of Porphyry copper deposits [J]. *Acta Geochim.*, 36 (1): 9-15.
- Ulrich T, Günther D and Heinrich C A. 2001. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit based on LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina [J]. *Economic Geology*, 96, 1743-1774.
- Wang Keyong, Qing Min, Sun Fengyue. 2010. Study on the geochemical characteristics of ore-forming fluids and genesis of Xiaoxinancha gold-copper deposit, Jilin Province [J]. *Acta Petrological Sinica*, 26(12): 3727-3734(in Chinese with English abstract).
- Wu Shangquan. 1986. Main geological characteristics and Genesis of the Xiaoxinancha gold copper deposit, in Jilin Province [J]. *Mineral deposit*, 5(2): 75-84(in Chinese with English abstract).
- Xie Hongjing, Wang Yuwang, Wang Lijuan, Jiang Wei, Zhang Yunguo, Kou Haichuan, Sun Zhiyuan. 2016. Fluid inclusions study of the Changhanboluo Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 43(2): 531-545 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiejiang, Men Lanjing, Chen Lei. 2008. SHRIMP U-Pb ages of Zircon and its geological implications from metamorphic dacite of the Wudaogou Group in Yanbian area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science edition)*, 38(3): 363-367(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics the model [J]. *Tectonophysics*, 75: 135-162.
- Zhang Mingjie, Meng Guanglu, Hu Peiqing. 2008. Chemical compositions of volatiles in Qilian ocean [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 44(4): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanbin. 2002. The Isotopic Geochronologic Frame of Granatic Magmatism in Yanbian area [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongguang. 2007. Study on the Metallogenesis and Models in Mesozoic Epithermal Gold Deposits in Yanbian, Jilin Province [D].

- Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junkang, Sun Jinggui, Men Lanjing. 2008. Characteristic and implication of Daughter minerals in Fluid inclusion of Xiaoxinancha gold-rich copper deposit [J]. Journal of Jilin University (Earth Science edition),38(3): 384-388(in Chinese with English abstract).
- Zheng Doufan, Piao Taoyun, Wan Yunsheng. 1983. Deposit Geological Characteristic and Metallogenic Regularity the Xiaoxinancha Gold-copper Deposit[M]. Changchun: Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, 1-52(in Chinese).
- Zhou Yan, Xian Jiaquan, Wang Tiefu. 2004. Isotope Geochemistry of the Xiaoxinancha Gold and Copper Deposit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(2): 133-136(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 何鹏,严光生,祝新友,张忠义,王艳丽,程细音,李永胜,甄世民,杜泽忠,贾德龙,巩小栋.2013.青海赛什塘铜矿床流体包裹体研究[J].中国地质,40(2):580-593.
- 解洪晶,王玉往,王莉娟,蒋炜,张云国,寇海川,孙志远. 2016. 内蒙古长汉卜罗铅锌银矿床流体包裹体研究[J]. 中国地质, 43(2): 531-545.
- 靳克. 2003. 延边地区中生代火山岩的岩石学和地球化学:对构造体制转换与岩石圈深部物质组成的制约[D].长春:吉林大学.
- 李文昌,刘学龙,曾普胜,尹光候. 2011. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征[J]. 中国地质, 38(2):403-414.
- 李荫清,陈殿芬.1995.吉林小西南岔富金铜矿床的流体包裹体及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 14(2): 151-156
- 刘丛强,黄智龙,李和平,苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘, 8, 231-243.
- 孟庆丽,周永昶,柴社力. 2001.中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床[M]. 吉林:吉林科学技术出版社, :1-162
- 任云生,王辉,屈文俊. 2011.延边小西南岔铜金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 36(4):721-728.
- 芮宗瑶,张洪涛,王龙生.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): 174-184.
- 孙超. 1994. 小西南岔金铜矿床同位素地质学研究[J]. 矿产与地质, 8(2): 119-123.
- 孙景贵,门兰静,赵俊康,陈雷,梁树能,陈冬,逢伟. 2008a. 延边小西南岔大型富金铜矿床区内暗色脉岩的锆石年代学及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 517-527.
- 孙景贵,陈雷,赵俊康. 2008b. 延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗岩杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 27(3): 319-328.
- 孙景贵,门兰静,陈冬. 2009. 岩浆作用对岩浆热液金铜成矿制约的元素地球化学和锆石 CL 图像记录——以延边小西南岔富金铜矿床为例[J]. 矿物岩石,29(3):43-52.
- 孙景贵,邢树文,郑庆道. 2006.中国东北部陆缘有色、贵金属矿床的地质、地球化学[M]. 长春:吉林大学出版社, 1-125.
- 孙景贵,赵俊康,陈军强. 2007. 延边小西南岔富金铜矿床的成矿机理研究:矿物流体包裹体的稀有气体同位素地球化学证据[J]. 中国科学(D辑),2007, 37(12):1-13.
- 王可勇,卿敏,孙丰月. 2010. 吉林小西南岔金铜矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因研究[J].岩石学报,26(12): 3727-3734.
- 吴尚全. 吉林小西南岔铜金矿床的主要地质特征及其成因[J].矿床地质,1986, 5(2): 75-84.
- 于介江,门兰静,陈雷. 延边地区五道沟群变质英安岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(3): 363-367.
- 张铭杰,孟广路,胡沛青,李立武,李钢柱. 祁连古大洋地幔流体化学组成[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2008,44(4):1-9.
- 张艳斌. 2002. 延边地区花岗质岩浆活动的同位素地质年代学格架[D]. 长春:吉林大学.
- 赵宏光. 2007. 延边中生代浅成热液金、铜矿床的成因与成矿模式研究[D]. 长春:吉林大学.
- 赵俊康,孙景贵,门兰静,陈雷. 2008. 小西南岔富金铜矿床流体包裹体中子矿物特征及意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38(3), 384-388.
- 郑斗范,朴洵允,万玉生. 1983. 小西南岔金铜矿床地质特征及成矿规律[M]. 长春:吉林省有色地质勘探局, 1-52.
- 周燕,咸嘉泉,王铁夫. 2004. 小西南岔金、铜矿床同位素地球化学[J]. 地球学报, 25(2): 133-136.