

黔西北香炉山铜矿床赋矿主岩矿物岩石学研究

李松涛^{1,2,3}, 陈庆刚¹, 夏勇², 何明友⁴, 刘建中¹, 周光红², 赵平¹, 张海⁵

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018; 2. 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 550002; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 5. 贵州省地质矿产勘查开发局 113 地质大队, 贵州 六盘水 553001)

摘要: 黔西北威宁地区香炉山铜矿床位于二叠系峨眉山玄武岩组第3段($P_3\beta^3$)顶部与宣威组(P_3x)底部之间, 属于玄武岩型铜矿床。针对其含矿地层宏观地质特征与赋矿主岩矿物岩石学组构, 本文以野外地质为基础, 系统开展岩矿鉴定、扫描电镜与电子探针分析等研究, 结果表明, 本矿床赋矿主岩为岩屑粉砂岩的矿石矿物为辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿和孔雀石, 脉石矿物为长石、石英、绿泥石和碳质物等; 赋矿主岩为火山角砾岩的矿石矿物为自然铜、斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿和孔雀石, 其脉石矿物为石英、绿泥石、白云石和粘土矿物等, 按其矿物含量, 原生矿石可分为自然铜+辉铜矿+赤铁矿矿石、自然铜+黄铜矿+黝铜矿矿石、黄铜矿+斑铜矿+赤铁矿矿石3种自然类型。根据矿物共生组合与相互穿插关系, 本矿床成矿作用可分为热液期和表生期, 其中, 热液期矿石矿物的形成顺序为斑铜矿→黄铜矿→黝铜矿→自然铜→辉铜矿, 表生期形成孔雀石、赤铜矿、赤铁矿、钛铁矿、褐铁矿等矿物。

关键词: 矿物岩石学; 玄武岩型铜矿; 热液期; 香炉山铜矿; 黔西北

中图分类号: P618.41; P57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0259-11

A study of the mineralogy and petrology of the copper-hosting rocks in the Xianglushan copper deposit, Weining, northwest Guizhou

LI Song-tao^{1,2,3}, CHEN Qing-gang¹, XIA Yong², HE Ming-you⁴, LIU Jian-zhong¹,
ZHOU Guang-hong², ZHAO Ping¹ and ZHANG Hai⁵

(1. No. 105 Geological Party, Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550018, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. No. 113 Geological Party, Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Liupanshui 553001, China)

Abstract: The Xianglushan copper deposit in Weining of northwest Guizhou is located in the copper bed between the top of the third unit of Emeishan basalt Formation and the bottom of Xuanwei Formation, and belongs to basalt type copper deposit. In order to study the geological characteristics of copper-hosting strata and mineralogical and petrological characteristics of copper-hosting rocks, the authors carried out rock-mineral determination, scanning electron microscope and electron microprobe analysis systematically in combination with field geological survey. The results show that the ore minerals of lithic siltstone are mainly composed of chalcocite, etrahedrite, bornite and malachite, and gangue minerals are mainly feldspar, quartz, chlorite and carbonaceous materials; the ore minerals of

收稿日期: 2016-09-26; 接受日期: 2017-07-10

基金项目: 贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目[黔地矿科合(2017)10号, 黔地矿科合(2016)13号, 黔地矿科合(2014)05号]

作者简介: 李松涛(1987-), 男, 博士研究生, 矿物学、矿石学、矿床学专业, E-mail: lisongtao@mail.gyig.ac.cn; 通讯作者: 陈庆刚(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查和成矿预测研究, E-mail: Cqg103@163.com。

volcanic breccia are mainly composed of pyrite, bornite, chalcopyrite, chalcocite, tetrahedrite and malachite, and gangue minerals are mainly quartz, chlorite, dolomite and clay minerals. According to main mineral content, primary ores can be divided into three natural types, i. e., natural copper + chalcocite + hematite ore, natural copper + chalcopyrite + tetrahedrite ore and chalcopyrite + bornite + hematite ore. On the basis of mineral assemblages and intercalation relationship, mineralization can be divided into hydrothermal stage and supergene stage. The sequence of ore minerals at the hydrothermal stage is bornite→chalcopyrite – tetrahedrite – natural copper→chalcocite. At the supergene stage, malachite, hematite, hematite, ilmenite and limonite have been formed.

Key words: mineralogy and petrology; basalt type copper deposit; hydrothermal stage; Xianglushan copper deposit; northwest Guizhou

Fund support: Geological Research Project of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province (GZDKYH2017-10, GZDKYH2016-13, GZDKYH2014-05)

玄武岩型铜矿床(点)在我国川滇黔地区广泛分布,20世纪中期以来,众多学者针对该区玄武岩型铜矿床进行了深入研究,并取得了丰硕成果。研究表明,其成矿地质特征与基韦诺(Keweenaw)型铜矿极为相似(朱炳泉等,2002a),具有较大找矿潜力(郭文魁,1978;朱炳泉,2002b,2002c;刘远辉,2006;李松涛,2016)。依据区域铜矿的产出特征,可将其划分为产于玄武岩中的铜矿、含碳质沉积岩夹层中的铜矿和宣威组底部古间断面碎屑岩中的铜矿(刘远辉,2006)。值得一提的是,在基韦诺地区对应宣威组底部层位没有铜矿产出(陈大,2015;覃廷荣等,2016)。对此,李厚民等(2006)将前两种铜矿称为沥青铜矿和碳质铜矿,钱壮志等(2006)将后一种铜矿类型定为铝土质泥岩铜矿。此外,对产于玄武岩及含碳质沉积岩夹层中铜矿床的成矿流体、成矿物源、成矿时代及矿床成因的研究发现,玄武岩型铜矿床存在两期成矿作用,同位素定年测出两期成矿作用的时间都晚于峨眉山玄武岩的喷发时期,排除了火山热液直接成矿的可能,认为该类型矿床为后生成矿作用中盆地流体萃取上地壳物质富集而成(李厚民等,2004,2006,2011;朱炳泉等,2005;李厚民,2009;李帅,2012;刘军港等,2014;王富东等,2016)。笔者曾经也对该类矿床的成矿作用进行了探讨,认为成矿与下伏的玄武岩以及后期热作用有关(李松涛,2014;孟昌忠等,2015;李松涛等,2016)。综上所述,前人的研究主要集中在产于玄武岩中与玄武岩层间含碳质沉积岩夹层中的铜矿化(吕绍玉等,2015),而对于产于玄武岩组与宣威组古间断面碎屑岩中的铜矿化研究较为薄弱。本文以黔西北威宁县香炉山地区产于玄武岩组与宣威组古

间断面碎屑岩中的铜矿为研究对象,主要从成矿地质背景、赋矿地层地质特征、赋矿主岩宏观和微观矿物学特征出发,系统研究该类型铜矿的矿物岩石学特征,为认识该类型铜成矿作用和地质勘探提供理论依据。

1 成矿地质背景

黔西威宁、六盘水、赫章一带为上扬子地层之黔西北地层小区,属于地台型建造。区域上从震旦系至第四系均有出露,尤其以石炭系、二叠系、三叠系最为发育,分布广泛。其中,震旦纪至二叠纪晚期以海相碳酸盐岩为主,早三叠世以后则为陆相碎屑沉积,晚二叠世时期喷溢的玄武岩分布广泛,厚度大(宋谢炎等,2005)。

区域构造属于上扬子准地台黔北台隆六盘水断陷威宁北西向构造变形区。褶皱以相间排列的北西向背斜与向斜为特点,主要形成小寨和乌蒙山褶皱。断裂构造以小江、弥勒-师宗和紫云-垭都为主,矿区则位于几处深大断裂所夹持的三角地带中。

矿区内出露地层有二叠系梁山组碎屑岩,栖霞和茅口组碳酸盐岩,峨眉玄武岩组玄武岩、火山碎屑岩,宣威组碎屑岩,三叠系飞仙关组粘土质碎屑岩夹碳酸盐岩,第四系的冲、坡积物(图1)。矿区内构造主要为香炉山短轴向斜和威宁-水城断裂带西段的北东部分。

矿区内主要分布两个铜矿体,其中以位于矿区南部的秋木沟矿体为主,矿体呈似层状,埋藏深度在200 m,厚度为1.00~6.37 m,一般在1.00~2.00 m之间。品位一般在0.10%~0.50%之间,高者可至组地层一致,倾向为340°~10°或170°~240°,倾角

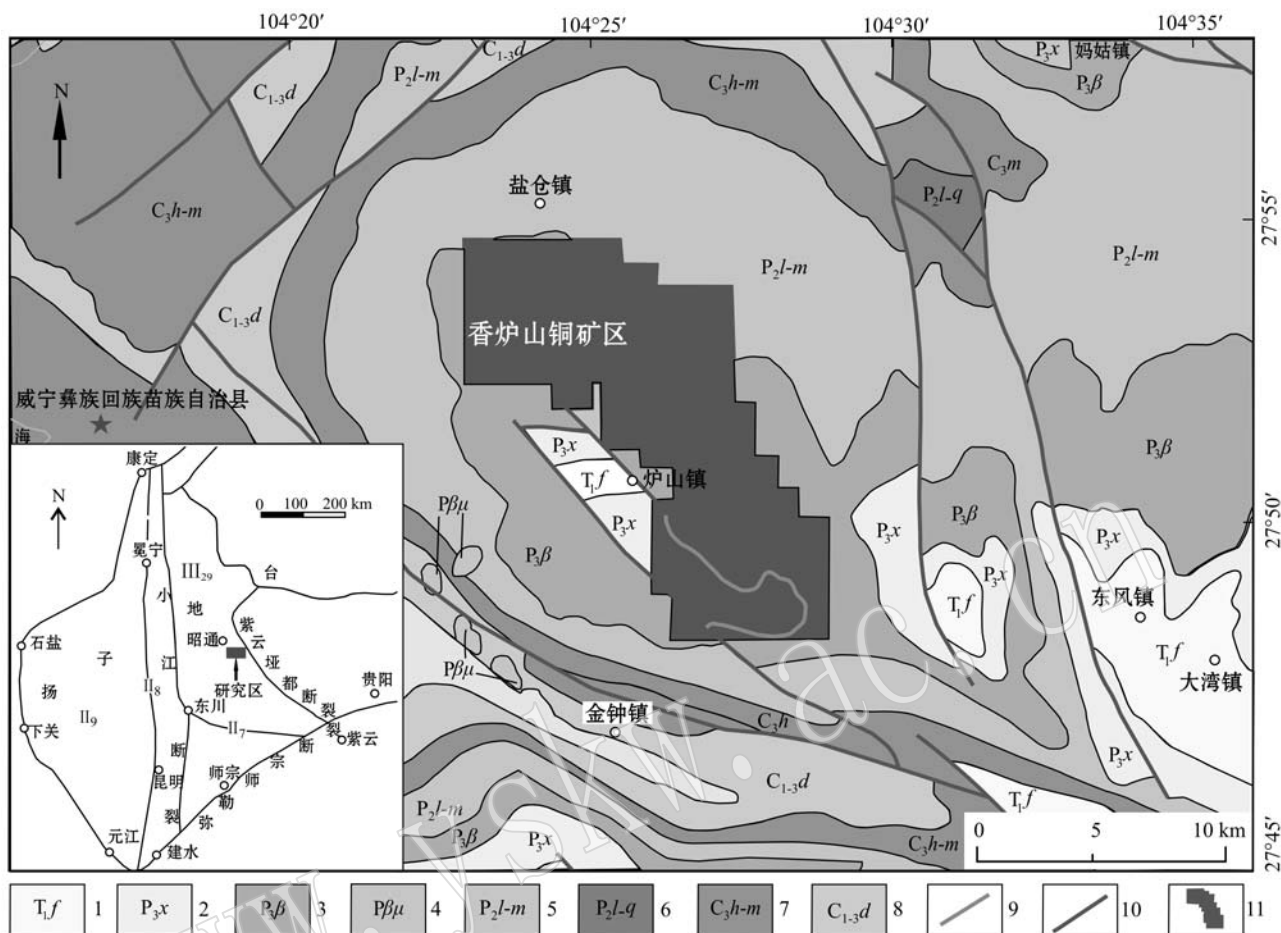


图1 黔西北威宁地区区域地质简图(据吕绍玉等, 2015)

Fig. 1 Simplified geological map of the Weining, northwest Guizhou (modified after Lü Shaoyu *et al.*, 2015)

1—下三叠统飞仙关组(泥岩夹粉砂岩); 2—上二叠统宣威组(粉砂岩夹泥岩); 3—上二叠统峨眉山玄武岩组(玄武岩夹凝灰岩); 4—二叠纪辉绿岩; 5—中二叠统梁山组至茅口组并层(灰岩夹砂岩); 6—中二叠统梁山组至栖霞组并层(灰岩与砂岩); 7—上石炭统黄龙组与马平组并层(灰岩夹白云岩); 8—石炭系大埔组(白云岩); 9—含铜矿层; 10—断层; 11—矿区范围; II₇—上扬子台褶带; III₂₉—昭通-威宁断裂带; II₈—康滇地轴; II₉—丽江台缘褶皱带

1—Lower Triassic Feixianguan Formation (mudstone intercalated with siltstone); 2—Upper Permian Xuanwei Formation (siltstone mudstones intercalated with mudstone); 3—Upper Permian Emeishan Basalt Formation (basalt intercalated with tuff); 4—Permian diabase; 5—Middle Permian Liangshan to Maokou Formation (limestone intercalated with sandstone); 6—Middle Permian Liangshan to Qixia Formation (limestone and sandstone); 7—Upper Carboniferous Huanglong and Maping Formation (limestone intercalated with dolomite); 8—Carboniferous Dapu Formation (dolomite);

9—copper-bearing ore bed; 10—fault; 11—mining area; II₇—Upper Yangtze platform fold belt; III₂₉—Zhaotong-Weining fault zone;

II₈—Xikang-Yunnan axis; II₉—Lijiang platform margin fold belt

为4°~15°。围岩蚀变以碳酸盐化、硅化、黄铁矿化为主,其次为绿泥石化、沸石化、沥青化,热液活动特征明显(李帅, 2012; Mo and Zou, 2013)。

2 赋矿地层特征

赋矿地层主要分布在香炉山短轴向斜的轴部及两翼,包含峨眉山玄武岩组第3段($P_2\beta^3$)顶部地层与宣威组(P_3x)底部地层,赋矿围岩分别以火山角砾岩与粉砂岩为主(图2)。

宣威组底部赋矿地层平均厚度约为2.10 m,岩性主要为含泥质粉砂岩、炭质泥岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩。含泥质粉砂岩呈深灰色,含大量植物化石及碎片,可见辉铜矿、斑铜矿及黄铁矿分布在炭化植物化石表面,表生矿物有孔雀石。炭质泥岩呈灰黑色至黑色,含结核状黄铁矿、黄铜矿,其大小在3~40 mm之间,分布团块状辉铜矿,偶见自然铜,表生矿物有孔雀石。粉砂质泥岩及泥质粉砂岩呈暗红色、紫红色,含少量凝灰质碎屑,厚0.50~1.41 m。

峨眉山玄武岩组顶部赋矿地层平均厚度约为

30.20 m,主要岩性为火山角砾岩、凝灰质火山碎屑岩及岩屑凝灰岩。火山角砾岩层见辉铜矿及马尾丝状、斑点状自然铜,伴生孔雀石化,局部地段为浅灰色铝土岩。在岩层底部,往往有高岭石粘土岩呈层状或团块分布于岩石中。岩层含 Cu 0.00% ~

1.07%,厚 0.30 ~4.52 m,这一岩层是区内铜矿体较厚且铜含量较稳定的主要赋矿层位;凝灰质火山碎屑岩层呈紫红色,局部含有少量鲕状赤铁矿,厚 0.00 ~2.50 m;岩屑凝灰岩层呈紫红色、红褐色,含赤铁矿,厚 10.00 ~28.50 m。

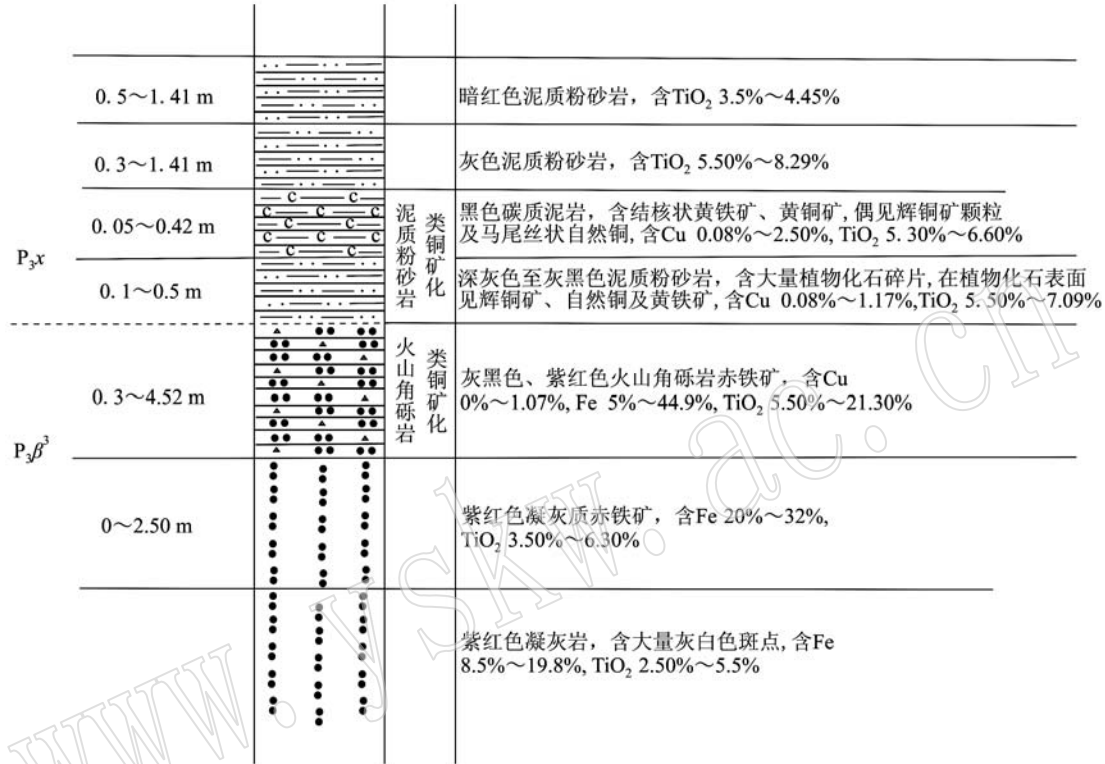


图 2 香炉山铜矿赋矿地层柱状图(据吕邵玉等, 2015)

Fig. 2 Ore-hosting strata columnar section of the Xianglushan copper deposit (modified after Lü Shaoyu *et al.*, 2015)

3 赋矿主岩岩石矿物学特征

本文主要采用野外观察、光薄片镜下鉴定、扫描电镜与电子探针分析相结合的方法研究了赋矿主岩的岩石矿物学特征。光薄片镜下鉴定在贵州省地质调查院完成。扫描电镜与电子探针测定分别在中国科学院地球化学研究所环境地球化学化学与矿床地球化学国家重点实验室完成,首先将岩石样品磨制成一定大小的光薄片,在普通光学显微镜下观察岩石的结构、构造、矿物组成及其空间关系,并确定待测矿物,然后进行喷碳,放到扫描电镜和电子探针样品室中,对目标矿物进行 SEM 和 EPMA 测试,进一步确定岩石微区组构。扫描电镜采用型号为 Tecnai G2 F20 S-TWIN TMP,最大加速电压 200 kV,放大倍数 50 ~ 1 100 000,点分辨率 0.24 nm,晶格分辨率

0.102 nm,能谱能量分辨率 136 eV。电子探针测试采用日本岛津公司生产的 EPMA-1600,Genesis 能谱仪,加速电压为 25 kV,束流 4.5 nA(能谱),电子束流稳定性好于 1.5×10^{-3} /H,分析元素为 Fe、S、Cu、Sb、As, Fe(Ka)S(Ka) 标样为黄铁矿, Cu(Ka) 为氧化亚铜, Sb(La) 为辉锑矿, As(La) 为砷化镓,检出限 0.1%,分析误差 <5%,室温 23°,湿度 55%。

3.1 赋矿主岩岩石学特征

(1) 层纹-条纹状含泥质岩屑粉砂岩

该类岩石呈深灰色,具细粒砂状结构,层纹-条纹状构造。主要由陆源碎屑、植物屑和填隙物 3 种组分构成,分布不均匀,各自顺层偏集呈层纹-条纹状产出(图 3a)。局部遭受强烈热液蚀变,蚀变矿物为石英、沸石、绿泥石、炭质物及少量白云石等。陆源碎屑含量为 75%,呈次圆状、圆状产出,粒度为 0.06 mm × 0.05 mm ~ 0.25 mm × 0.10 mm,碎屑成

分主要为玄武质岩屑及少量长石、石英、绿泥石、海绿石等矿物屑, 矿物成熟度低; 植物屑含量约为2%, 主要为陆相的炭化木植物碎片, 保存不完整(较破碎), 局部见磨圆现象, 粒度为 $0.06\text{ mm} \times$

$0.03\text{ mm} \sim 2.00\text{ mm} \times 1.50\text{ mm}$, 为砂级植物屑(图3b); 填隙物含量为21%, 主要为泥质矿物, 结晶粒度 $<0.004\text{ mm}$, 其次为辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、孔雀石等矿物。

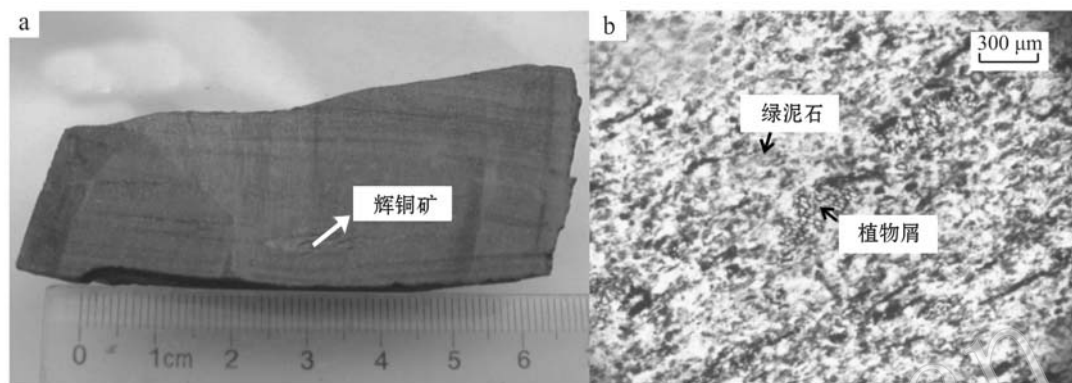


图3 香炉山铜矿含岩屑粉砂岩组构特征

Fig. 3 Rock fabric of lithic siltstone from the Xianglushan copper deposit

a—层纹-条纹状构造(自然光); b—细粒砂状结构(单偏光)

a—laminar-streaky structure (natural light); b—fine sand texture (plainlight)

(2) 铜矿化火山角砾岩

该类岩石呈紫红色, 具火山角砾结构(图4a)、杏仁状构造(图4b)。主要由火山碎屑和填隙物两组分构成, 矿物集合体似层状产出。火山碎屑含量为85%, 粒度 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \sim 64.00\text{ mm} \times 45.00\text{ mm}$, 呈棱角状、次棱角状产出, 圆度较差。碎屑成分基本上为玄武质岩屑, 具褐铁矿化、白云石化, 岩屑内部通常保存大量浑圆状杏仁体; 填隙物含量为15%, 相对于火山碎屑起胶结作用(相当于孔隙式胶结)。填

隙物主要由以下几部分构成: ① 火山灰含量约4%, 粒度 $<2.00\text{ mm}$, 与火山角砾同质, 具粘土化现象; ② 白云石含量约2%, 粒度 $0.02 \times 0.01\text{ mm} \sim 2.00\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}$, 呈它形粒状(图4c), 为火山碎屑蚀变矿物, 显示热液活动特征; ③ 赤铁矿含量约1%, 含有钛铁矿、金红石等细微混入物, 其粒度 $<0.20\text{ mm}$; ④ 自然铜、斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、孔雀石等矿物含量约9%, 在样品中呈少量矿物构成形式产出。

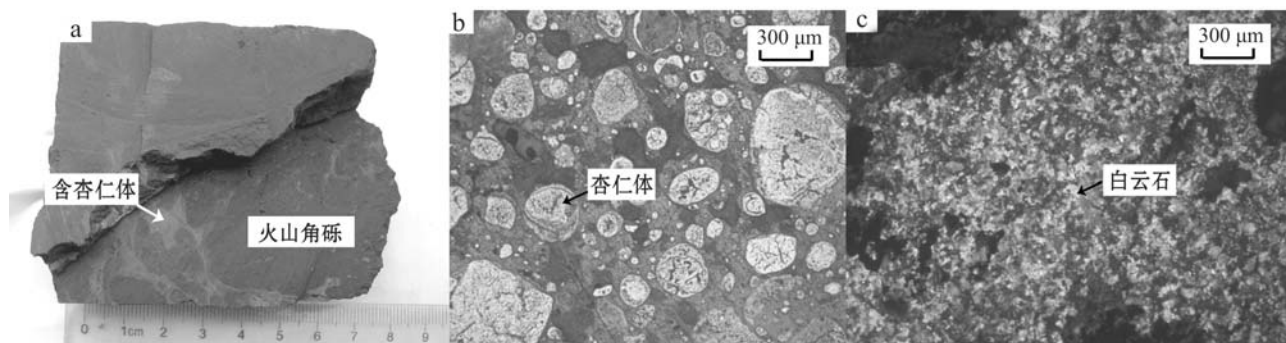


图4 香炉山铜矿火山角砾岩组构特征

Fig. 4 Rock fabric of volcanic breccia from the Xianglushan copper deposit

a—火山角砾结构(自然光); b—杏仁状构造(反射光); c—白云石它形粒状结构(正交偏光)

a—volcanic breccia texture (natural light); b—amygdaloidal structure (reflected light); c—anhedral gran texture of dolomite (crossed nicols)

3.2 不同赋矿主岩矿石矿物学特征

(1) 层纹-条纹状含泥质细粒岩屑粉砂岩

矿石矿物主要包含辉铜矿、斑铜矿、孔雀石,在平面和垂向上均显示一定分带特征,矿化明显受岩石沉积分层控制。矿物颗粒呈它形粒状、细脉状分布于岩石中,斑铜矿与辉铜矿或黄铜矿构成文象连生。矿物具它形粒状、文象结构,矿石具星点、浸染状构造。各矿物特征如下:

辉铜矿含量为6%,为主要矿石矿物,大部分呈

浸点状产于岩石碎屑间,粒度为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 10.00\text{ mm} \times 2.00\text{ mm}$,为粗-微粒级。普遍与斑铜矿密切共生,放大显示为似文象结构的辉铜矿-斑铜矿组合,即辉铜矿交代斑铜矿(图5e)。图5e中辉铜矿电子探针能谱分析结果中Cu和S的质量分数接近理论值(黄崇轲等,2001),分别为79.65%、20.35%,经计算(勒斯勒,1985)得到矿物的晶体化学式为 $\text{Cu}_{1.98}\text{S}$,属于久辉铜矿(Nobuo, 1962)。

斑铜矿含量为5%,为主要矿石矿物,粒度为

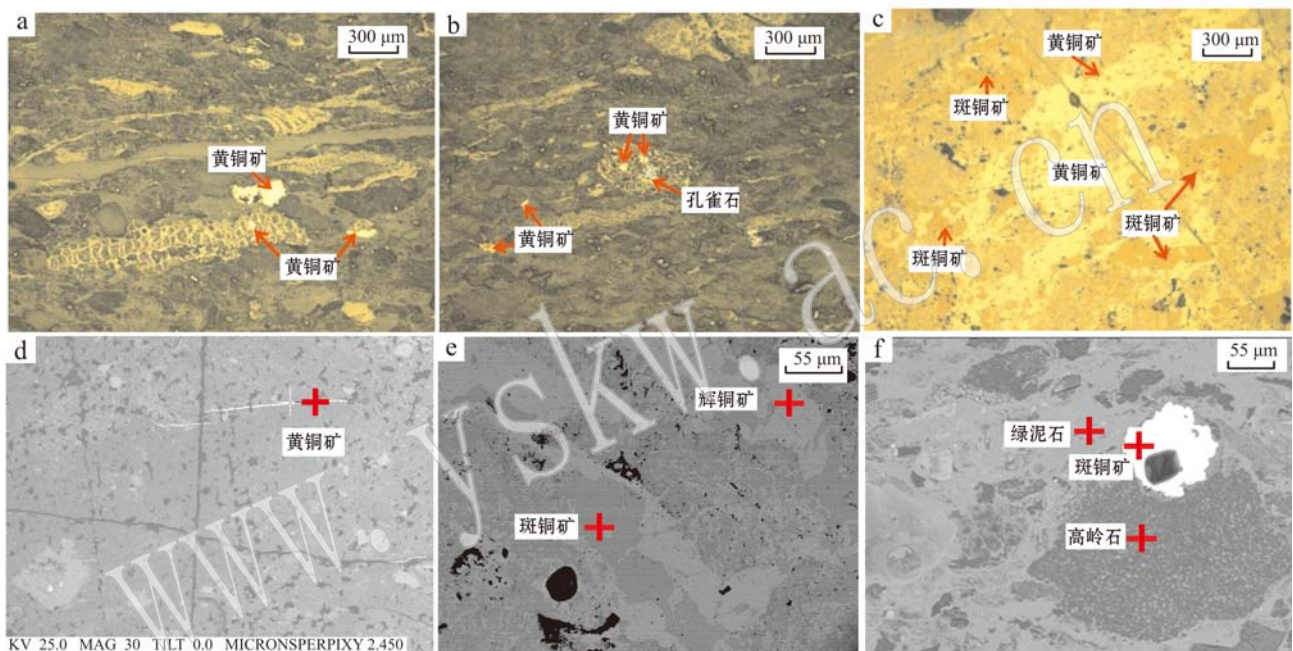


图5 香炉山铜矿岩屑粉砂岩矿石显微特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of lithic siltstone from the Xianglushan copper deposit

a—黄铜矿分布于木质碎屑中及砂粒碎屑间隙(反射光); b—黄铜矿浸点状分布于木质碎屑中(反射光); c—黄铜矿与斑铜矿形成似文象结构(反射光); d—脉状黄铜矿(BSE); e—斑铜矿与辉铜矿形成似文象结构(BSE); f—斑铜矿分布于绿泥石与高岭石结合部(BSE)

a—chalcopyrite distributed in woody debris and sand debris gap (reflected light); b—chalcopyrite disseminated in woody debris (reflected light); c—graphic texture of chalcopyrite and bornite (reflected light); d—veined chalcopyrite (BSE); e—graphic texture of bornite and chalcocite (BSE); f—bornite distributed along the boundary of chlorite and kaolinite (BSE)

$0.05\text{ mm} \times 0.02\text{ mm} \sim 2.00\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}$,主要呈它形粒状分布在碎屑颗粒边缘或嵌布于胶结物中。常见斑铜矿与黄铜矿相互包裹、毗连镶嵌,形成似文象结构(图5c),表明黄铜矿形成早于斑铜矿。斑铜矿与脉石矿物石英、长石及辉石紧密伴生,周围分布有高岭石、绿泥石等蚀变矿物,或者分布于高岭石与绿泥石的接触部位(图5f)。电子探针能谱分析结果表明各元素质量分数变化极小,接近理论值(黄崇轲等,2001)。图5e中斑铜矿Cu含量为63.89%,Fe为11.16%,S为24.95%;图5f中斑铜矿Cu含量为

63.00%,Fe为11.62%,S为25.38%,由此得到它们的晶体化学式分别为 $\text{Cu}_{1.29}\text{Fe}_{0.26}\text{S}$ 和 $\text{Cu}_{1.24}\text{Fe}_{0.29}\text{S}$ 。

黄铜矿含量为3%,粒度为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 3.50\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}$,呈不规则粒状、脉状分布于生物碎屑和基质中,或与斑铜矿形成似文象结构(图5c、5d),生物碎屑可见明显的木质细胞结构,细胞周围已经碳化、硅化及粘土化,斑铜矿沿着木质碎屑粒内空隙进一步交代,局部已经氧化形成孔雀石(图5a、5b)。图5d黄铜矿中Cu含量为35.30%,略高于理论组成值,Fe为29.08%,略低于理论组成值,S为

34.20%, 略低于理论组成值(黄崇轲等, 2001), 由此得到其晶体化学式为 $\text{Cu}_{0.53}\text{Fe}_{0.51}\text{S}$, 显示富铜贫硫、铁的特征, 暗示其形成可能有富铜贫硫的流体参与。

孔雀石含量为1%, 粒度 $<0.02\text{ mm} \times 0.02\text{ mm}$, 隐晶级, 呈它形粒状分布在碎屑颗粒裂隙中, 为铜硫化物的表生氧化产物, 周围留有辉铜矿、斑铜矿及黝铜矿等残余物(图5b)。

(2) 铜矿化火山角砾岩

矿石矿物为辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿和孔雀石, 脉石矿物以长石、石英、绿泥石和碳质物为主, 主要为一套中低温热液成因的矿物组合。按主要矿物的相对含量, 矿石可分为原生矿石和氧化矿石两类, 平面和垂向上都具有明显分带。根据矿石矿物组合可将原生矿石分为自然铜+辉铜矿(+赤铁矿)矿石、自然铜+黄铜矿+黝铜矿矿石、黄铜矿+斑铜矿矿石这3种自然类型。氧化矿石由孔雀石、蓝铜矿、铜蓝组成。

① 自然铜+辉铜矿(+赤铁矿)矿石: 矿石矿物主要包含自然铜和辉铜矿, 脉石矿物主要包含石英、

金红石、白云石、赤铁矿、长石、绿泥石和高岭石等, 其中自然铜含量为4%, 呈浸点状分布于火山角砾边缘, 其结晶粒度为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 1.50\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}$, 主要为细-微粒级的它形粒状晶体, 边缘被辉铜矿交代形成假像(图6a), 中心成分仍为自然铜, 说明自然铜形成晚于辉铜矿。辉铜矿含量为1%, 结晶粒度为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 15.00\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}$, 分布于绿泥石、石英内部裂隙中和赤铁矿边缘, 或被绿泥石溶蚀, 使其呈不连续脉状产出(图6a、6e), 边部被氧化, 视域中可见伴生的孔雀石。图6e 辉铜矿各元素的质量分数接近理论值(黄崇轲等, 2001), 其中 Cu 为 79.81%, S 为 20.19%, 由此得到晶体化学式为 $\text{Cu}_{1.99}\text{S}$, 属于久辉铜矿(Nobuo, 1962)。

② 自然铜+黄铜矿+黝铜矿矿石: 矿石矿物主要为自然铜、黄铜矿和黝铜矿, 含少量孔雀石, 脉石矿物为石英、高岭石、绿泥石、白云石及有机质碎屑。自然铜含量为3%, 呈团块状、星点状分布于火山角砾与碎屑基质的结合处, 其结晶粒度为 $0.03\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 1.50\text{ mm} \times 0.60\text{ mm}$, 边缘分布有细脉状

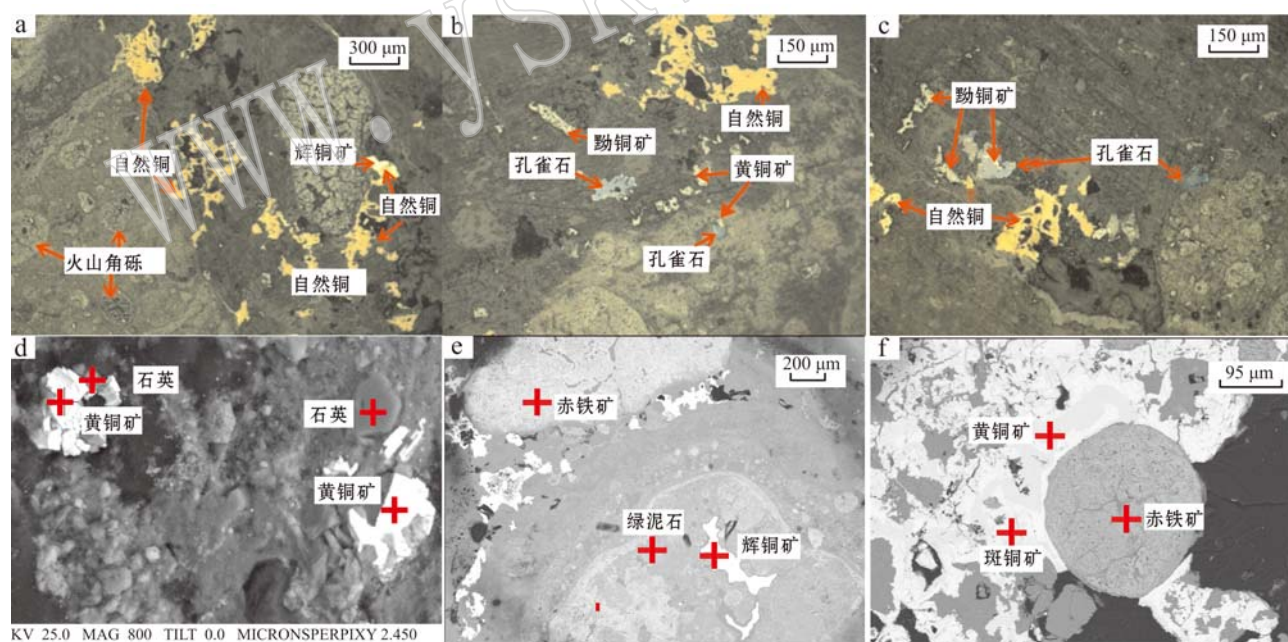


图6 香炉山铜矿火山角砾岩矿石显微特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of volcanic breccia from the Xianglushan copper deposit

a—它形粒状、团块状自然铜, 自然铜被辉铜矿交代(反射光); b—它形粒状、团块状自然铜、黄铜矿及柱状黝铜矿(反射光); c—它形粒状自然铜、黝铜矿, 黝铜矿边沿具孔雀石化(反射光); d—它形粒状黄铜矿, 边沿被石英溶蚀(BSE); e—不连续脉状辉铜矿(BSE); f—斑铜矿与黄铜矿形成似文象结构(BSE)

a—anhedral granular and crumby native copper replaced by chalcocite (reflected light); b—anhedral granular and crumby native copper, chalcocite and plate-prismatic tetrahedrite (reflected light); c—anhedral granular native copper, tetrahedrite with peacock petrochemistry (reflected light); d—anhedral granular chalcocite with edge dissolution by quartz (BSE); e—discontinuous veined chalcocite (BSE); f—graphic texture of bornite and chalcocite (BSE)

石英(图 6b、6c);黄铜矿含量小于 1%,其结晶粒度为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 1.00\text{ mm} \times 0.50\text{ mm}$,以不规则粒状沿火山角砾与基质的结合部位呈珠串状分布,部分颗粒边缘被氧化为孔雀石(图 6b)。黝铜矿含量小于 1%,矿物粒径为 $0.02\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 1.00\text{ mm} \times 0.50\text{ mm}$,细-微粒级,以不连续条带状、它形粒状及长柱状产于围岩碎屑中,部分与黄铜矿或自然铜连生,局部矿物边缘发育孔雀石化,中间留有黝铜矿残余(图 6b、6c)。

③ 黄铜矿 + 斑铜矿矿石:矿石矿物主要为黄铜矿和斑铜矿,脉石矿物为石英、金红石、高岭石、绿泥石、赤铁矿及有机质碎屑。黄铜矿含量为 3%,其产出方式有团块状和细脉状 2 种。团块状黄铜矿的粒度一般为 $0.05\text{ mm} \times 0.01\text{ mm} \sim 4.00\text{ mm} \times 2.50\text{ mm}$,分布于碎屑颗粒的边缘或充填于岩石空隙中,可见部分粒状黄铜矿边缘被石英、高岭石等溶蚀,呈港湾状(图 6d)。细脉状黄铜矿主要分布于黄铁矿裂隙中,其脉宽为 1~3 mm 或更细,脉长在 2~10 mm 之间。可见部分黄铜矿分布于由黄铁矿氧化而来的赤铁矿边缘(图 6f),显示赤铁矿、黄铜矿、黄铁矿分带现象。图 6f 中黄铜矿各元素质量分数上下变化极小,接近理论值(黄崇轲等,2001),其中 Cu 含量为 35.94%,Fe 为 30.51%,S 为 33.54%,由此得到晶体化学式为 $\text{Cu}_{0.54}\text{Fe}_{0.52}\text{S}$ 。斑铜矿含量为 1%,结晶粒度为 $2.50 \times 1.00 \sim 0.03 \times 0.01\text{ mm}$,以细-微粒级为主,普遍与黄铜矿构成似文象结构(图 6f),即黄铜矿交代斑铜矿,部分呈不规则粒状残留于被辉铜矿交代的核部,显示斑铜矿→黄铜矿→辉铜矿的生成顺序。图 6f 斑铜矿各元素质量分数接近理论值(黄崇轲等,2001),其中 Cu 为 61.85%,Fe 为 12.71%,S 为 25.44%,由此得到晶体化学式为 $\text{Cu}_{1.23}\text{Fe}_{0.29}\text{S}$ 。

④ 氧化矿石:矿石矿物主要由孔雀石、蓝铜矿组成,脉石矿物包含褐铁矿,赤铁矿、高岭石、绿泥石,矿石以蜂窝状、薄膜状及团块状构造为主,孔雀石和蓝铜矿分布于矿物裂隙、碎屑颗粒间隙及岩石表面(图 6b、6c、6e、6f),其为自然铜及铜的硫化物氧化而成。

4 讨论

4.1 成矿作用分析

结合香炉山铜矿床野外特征与镜下分析,不难

发现岩屑粉砂岩和火山角砾岩中均有辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿和孔雀石等硫化物或氧化物,它们主要以它形粒状分布于碎屑之间,部分呈细脉状分布于绿泥石、石英等蚀变矿物内部裂隙或基质中,暗示香炉山铜矿与区域 Cu 成矿过程一样,经历了低-中温的热液成矿阶段(李厚民等,2004; Zhang *et al.*, 2007)。值得探讨的是火山角砾岩中含有大量自然铜,而岩屑粉砂岩中仅含少量自然铜,结合自然铜与碳质物的空间关系与前人研究(李厚民,2009),这可能由于两者所含碳质物的形成方式不同所致,即碎屑岩中的碳质物(图 3b、5a、5b)为同生沉积植物屑(李厚民,2009),自然铜在形成过程中较早、较完全地被还原成铜金属硫化物;角砾岩中的碳质物主要为后期含碳的有机质流体变质而来(李厚民,2009),在碳质附近沉淀下来的自然铜,仅部分被还原成铜金属硫化物。此外,火山角砾岩中普遍产出的黝铜矿在岩屑粉砂岩中较少出现,As 或 Sb 的富集通常是区别热液成因与正常沉积的重要标志(White, 1980),推测有一期含 Sb 的热液流体改造过矿石,且对火山角砾岩的改造程度要大于粉砂岩。

已有研究表明威宁地区玄武岩型铜矿中辉铜矿与黄铁矿的硫都为生物分解的硫,两者具有成因联系,即辉铜矿主要是由含铜的流体对黄铁矿改造形成(Zhang *et al.*, 2007)。本文电子探针分析表明辉铜矿主要为低温条件下形成的久辉铜矿,推测该区辉铜矿除了由普遍认为的氧化与次生富集作用形成以外,还可能由中低温流体对原生硫化物(如黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿等)交代形成。综上所述,笔者认为该铜矿床主要为中低温热液流体对原生硫化物叠加改造形成。

4.2 各成矿期矿物组成及形成顺序分析

根据香炉山铜矿床矿物共生组合及相互穿插关系,可将该矿床划分为热液期和表生期。热液期金属矿物组成相对复杂,主要有自然铜、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿和黝铜矿等,非金属矿物主要包含石英、绿泥石、白云石、高岭石和碳质物等,主要矿物组合为:黄铜矿 + 碳质物;辉铜矿 + 斑铜矿 + 高岭石,斑铜矿 + 绿泥石 + 高岭石;自然铜 + 辉铜矿;自然铜 + 黄铜矿 + 黝铜矿;黄铁矿 + 辉铜矿 + 绿泥石;黄铁矿 + 黄铜矿 + 斑铜矿 + 石英。相应的蚀变为硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化、沥青化、高岭石化。表生期主要为沉积或热液期矿物经表生风化过程形成一系列氧化产物。

(1) 热液期矿物形成顺序

斑铜矿普遍与黄铜矿构成似文象结构,局部见黄铜矿环绕未被置换的斑铜矿残余部分(图 5c、6f),同时与辉铜矿形成似文象结构的辉铜矿—斑铜矿组合,部分则呈不规则粒状残留于辉铜矿中心(图 5e),显示辉铜矿→黄铜矿→斑铜矿依次交代的特征。黝铜矿与部分黄铜矿或自然铜连生(图 6b、6c),说明黝铜矿、自然铜和黄铜矿近于同时形成。自然铜边缘被辉铜矿交代形成假像,中心留有自然铜呈它形粒状(图 6a),说明辉铜矿形成晚于自然铜。因此,矿石矿物的形成顺序为斑铜矿→黄铜矿—黝铜矿—自然铜→辉铜矿,矿物成分上表现为 S 含量先增加再减少, Cu 含量整体表现为先减少再增加。粉砂岩中主要矿石矿物含量关系为斑铜矿 < 黄铜矿 < 辉铜矿,这与矿物生成的顺序是一致的,暗示越到成矿晚期,热液流体中越加贫铁富铜,并且成矿晚期流体对早期矿物进行了广泛置换。

矿石中脉石矿物与矿石矿物相伴产出,细脉状黄铜矿主要分布于黄铁矿裂隙中,可见黄铜矿分布于由黄铁矿氧化而来的赤铁矿边缘(图 6f),部分黄铜矿边沿被石英、高岭石等溶蚀,呈港湾状(图 6d)。斑铜矿与脉石矿物石英、长石及辉石紧密伴生,周围分布有高岭石、绿泥石等蚀变矿物,或者分布于高岭石与绿泥石的接触部位(图 5f),部分斑铜矿呈它型粒状分布于木质细胞中(图 5a、5b)。

(2) 表生期矿物组成

表生期铜元素通过表生淋滤作用从原生自然铜及被氧化分解的金属硫化物中析离出来,然后在矿物裂隙、碎屑颗粒间隙及岩石表面形成氧化物、碳酸盐等次生矿物。主要矿物为孔雀石、赤铜矿、赤铁矿、钛铁矿、褐铁矿。钛氧化物富集程度较高,这可能与该区巨厚峨眉山玄武岩中的金红石、锐钛矿含量高、化学稳定性高有关,风化剥蚀后易沉积于火山凹洼盆地内。此外,金红石、锐钛矿中的钛易于回收利用,因此可以考虑钛元素综合利用的可能性。

5 结论

综上所述,可以得出如下结论:

(1) 香炉山铜矿床产于峨眉山玄武岩组第 3 段 ($P_3\beta^3$) 顶部及宣威组 (P_3x) 底部,成矿受岩层控制,具多层成矿性。矿体分布在香炉山向斜的轴部及两翼,赋矿主岩为火山角砾岩与细粒岩屑粉砂岩。

(2) 不同赋矿主岩的矿石矿物成分有差异:岩屑粉砂岩的矿石矿物为辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、孔雀石,脉石矿物为长石、石英、绿泥石、碳质物等;火山角砾岩的矿石矿物为自然铜、斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、孔雀石,脉石矿物为长石、石英、白云石、金红石、绿泥石、粘土矿物,原生矿石包含自然铜+辉铜矿+赤铁矿矿石、自然铜+黄铜矿+黝铜矿矿石、黄铜矿+斑铜矿+赤铁矿矿石 3 种自然类型。

(3) 香炉山铜矿床主要为中低温热液流体对原生硫化物叠加改造形成。根据矿石矿物共生组合与相互穿插关系,将成矿分为热液期和表生期,热液期矿石矿物的形成顺序为斑铜矿→黄铜矿—黝铜矿—自然铜→辉铜矿。表生期形成孔雀石、赤铜矿、赤铁矿、钛铁矿、褐铁矿。

致谢 论文撰写过程中得到贵州地矿局 105 地质队王泽鹏博士的大力支持和帮助,在此表示致谢!同时感谢匿名专家认真审阅并提出诸多宝贵意见!

References

- Chen Da. 2015. Comparison of the basalt copper deposits in the Keweenaw peninsula of Michigan (USA) and the adjacent area of Yunnan-Guizhou provinces (China) [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, (1): 110 ~ 127 (in Chinese with English abstract).
- Guo Wenkui, Chang Yinfu and Huang Chongke. 1978. Some problems of metallogenesis and distribution of the main copper deposits in china [J]. *Acta Geologica Sinica*, 52(3): 169 ~ 181 (in Chinese with English abstract).
- Huang Chongke, Bai Ye, Zhu Yusheng, et al. 2001. Copper Deposit of China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Li Houmin. 2009. Three ore-forming fluids of basalt copper deposits in Emeishan [J]. *Journal of Minerals*, S1: 219 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Mao Jingwen, Xu Zhangbao, et al. 2006. Copper mineralization characteristics of the Emeishan basalt district in the Yunnan-Guizhou border area [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 5: 495 ~ 502 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Mao Jingwen and Zhang Changqing. 2011. Geochemistry of fluid inclusions of the basalt copper deposits in adjacent area of northeastern Yunnan and western Guizhou, China [J]. *Journal of Earth Sciences & Environment*, 33(1): 14 ~ 23, 33 (in Chinese with English abstract).

- with English abstract).
- Li Houmin, Mao Jingwen, Zhang Changqing, *et al.* 2004. Isotopic geochemistry of Emeishan basalt copper deposits in northeastern Yunnan and western Guizhou[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 232 ~ 240 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuai. 2012. The Ore Deposit Geological Features and Genesis Study of the Shizidong Copper Deposit in Weining Country, Guizhou Province[D]. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Songtao. 2014. Geological and Geochemical Characteristics of Iron-copper Deposits in Lushan Area, Weining, Northwest Guizhou[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Songtao, Liu Jianzhong, He Mingyou, *et al.* 2016. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Xianglushan copper deposit in Weining, Northwest Guizhou[J]. *Geology and Exploration*, 5: 826 ~ 837 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jungang, Zhang Balin, Shen Xiaoli, *et al.* 2014. Geological characteristics and ore-forming material sources of the Shuicaogou copper deposit in the Jianshui area of Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, (5): 840 ~ 854 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuanhui. 2006. Characteristic of copper deposit associated to the basalt in the southwest Guizhou and forecast of prospecting[J]. *Guizhou Geology*, 1: 57 ~ 61, 28 (in Chinese with English abstract).
- Lü Shaoyu, Zhang Hai, Meng Changzhong, *et al.* 2015. Geological characteristics of the Lushan copper deposit, Weining county, Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 3: 49 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Meng Changzhong, He Mingyou, Zhang Hai, *et al.* 2015. Mineralogy and petrology of iron-copper bearing strata in Weining, Northwest Guizhou[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 5: 1 058 ~ 1 063 (in Chinese with English abstract).
- Mo Zhao and Zou Lizhi. 2013. Analysis on the geological feature and genesis of one copper ore deposit in Weining County of Guizhou Province[J]. *Technological Development of Enterprise*, 32(25): 50 ~ 52.
- Nobuo Morimoto. 1962. Djurleite, a new copper sulfide mineral[J]. *Mineral. J. Japan*, 3: 338 ~ 344.
- Qian Zhuangzhi, Hou Shuguang, Zhang Zhengjun, *et al.* 2006. Discovery of a bauxitic mudstone-hosted copper deposit in the Huize area, Northeastern Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 4: 492 ~ 495 (in Chinese with English abstract).
- Qin Tingrong and Wei Aijun. 2016. Comparison of basalt Cu deposits in Yunnan-Guizhou to the Keweenaw Cu deposit[J]. *Acta Geologica Sichuan*, (2): 247 ~ 252 (in Chinese with English abstract).
- Rosler H J and Lange H. 1985. *Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 5 ~ 8 (in Chinese).
- Song Xieyan, Zhang Chengjiang, Hu Ruizhong, *et al.* 2005. Genetic links of magmatic deposits in the Emeishan large igneous province with dynamics of mantle plume[J]. *Journal of Minerals Rocks*, 4: 35 ~ 44 (in Chinese).
- Wang Fudong, Zhu Xiaoqing, Wang Zhonggang, *et al.* 2016. Fluid inclusions of Layimu basalt native copper deposit in the Sichuan-Yunnan-Guizhou border area[J]. *China Geoscience*, (3): 567 ~ 576 (in Chinese with English abstract).
- White D E. 1980. Active geothermal systems and hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 75th Ann.: 392 ~ 423.
- Zhang Qian, Zhu Xiaoqing, Zhang Zhengwei, *et al.* 2007. Discussion on the ore-forming prospecting of the Emeishan basalt-type native copper-chalcite deposits in the Weining district of Guizhou province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27: 379 ~ 383.
- Zhu Bingqun, Chang Xiangyang, Hu Yaoguo, *et al.* 2002c. Discovery of Yanhe copper deposit in the Yunnan-Guizhou border area and a new train of thought for copper prospecting in the large igneous[J]. *Advances in Earth Science*, 6: 912 ~ 917 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Binquan, Dai Chanmo, Hu Yaoguo, *et al.* 2015. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Th-Pb dating for native copper mineralization of two stages from the Emeishan flood basalts in northwestern Yunnan Province[J]. *China Geochimica*, 34(3): 235 ~ 247 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Binquan, Hu Yaoguo, Zhang Zhengwei, *et al.* 2002a. Discovery of the copper deposits with features of the Keweenaw type in the border area of Yunnan and Guizhou provinces[J]. *Scientia Sinica*, S1: 49 ~ 59 (in Chinese).
- Zhu Binquan, Zhang Zhengwei and Hu Yaoguo. 2002b. Discovery of volcanic tuff breccia controlled copper deposits with industrial value in northeastern Yunnan[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8~9): 213 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈 大. 2015. 基韦诺半岛与滇黔地区玄武岩铜矿对比研究[J]. *大地构造与成矿学*, (1): 110 ~ 127.
- 郭文魁, 常印佛, 黄崇柯. 1978. 我国主要类型铜矿成矿和分布的某

- 些问题[J]. 地质学报, 52(3): 169~181.
- 黄崇轲, 白冶, 朱裕生, 等. 2001. 中国铜矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 勒斯勒 H J, 朗格 H. 1985. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 5~8.
- 李厚民. 2009. 峨眉山玄武岩铜矿的三种成矿流体[J]. 矿物学报, S1: 219~220.
- 李厚民, 毛景文, 张长青. 2011. 滇黔交界地区玄武岩铜矿流体包裹体地球化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 14~23, 33.
- 李厚民, 毛景文, 徐章宝, 等. 2006. 滇黔交界地区峨眉山玄武岩铜矿化蚀变特征[J]. 地球学报, 5: 495~502.
- 李厚民, 毛景文, 张长青, 等. 2004. 滇黔交界地区玄武岩铜矿同位素地球化学特征[J]. 矿床地质, 23(2): 232~240.
- 李帅. 2012. 贵州省威宁县狮子洞铜矿床地质特征及成因研究(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 李松涛. 2014. 黔西北威宁炉山地区铁铜矿地质地球化学特征研究(硕士学位论文)[D]. 成都理工大学.
- 李松涛, 刘建中, 何明友, 等. 2016. 黔西北威宁地区香炉山铜矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 5: 826~837.
- 刘军港, 张宝林, 沈晓丽, 等. 2014. 云南建水水草冲铜矿床地质特征及成矿物质来源[J]. 地质与勘探, (5): 840~854.
- 刘远辉. 2006. 贵州西南部与玄武岩有关的铜矿特征及找矿前景[J]. 贵州地质, 1: 57~61, 28.
- 吕绍玉, 张海, 孟昌忠, 等. 2015. 贵州省威宁县炉山铜矿床地质特征研究[J]. 中国地质调查, 3: 49~53.
- 孟昌忠, 何明友, 张海, 等. 2015. 黔西北威宁地区含铁铜地层及其矿物岩石学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 5: 1058~1063.
- 钱壮志, 侯蜀光, 章正军, 等. 2006. 滇东北会泽地区发现铝土质泥岩铜矿[J]. 地质通报, 4: 492~495.
- 覃廷荣, 魏爱军. 2016. 滇黔玄武岩铜矿与北美基韦诺型铜矿对比[J]. 四川地质学报, (2): 247~252.
- 谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 等. 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系[J]. 矿物岩石, 4: 35~44.
- 王富东, 朱笑青, 王中刚, 等. 2016. 川滇黔接壤区拉木玄武岩铜矿流体包裹体[J]. 现代地质, (3): 567~576.
- 朱炳泉, 常向阳, 胡耀国, 等. 2002c. 滇黔边境鲁甸沿河铜矿床的发现与峨眉山大火成岩省找矿新思路[J]. 地球科学进展, 06: 912~917.
- 朱炳泉, 戴檀谟, 胡耀国, 等. 2005. 滇东北峨眉山玄武岩中两阶段自然铜矿化的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 与 U-Th-Pb 年龄证据[J]. 地球化学, 34(3): 235~247.
- 朱炳泉, 胡耀国, 张正伟, 等. 2002a. 滇黔地球化学边界似基韦诺(Keweenaw)型铜矿床的发现[J]. 中国科学, S1: 49~59.
- 朱炳泉, 张正伟, 胡耀国. 2002b. 滇东北发现具工业价值的火山凝灰角砾岩层控型铜矿床[J]. 地质通报, 21(8~9): 21.