

安徽庐枞沙溪斑岩铜矿蚀变及矿化特征研究^{*}

袁峰¹ 周涛发¹ 王世伟¹ 范裕¹ 汤诚¹ 张千明² 俞沧海³ 石诚³

YUAN Feng¹, ZHOU TaoFa¹, WANG ShiWei¹, FAN Yu¹, TANG Cheng¹, ZHANG QianMing², YU CangHai³ and SHI Cheng³

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

2. 安徽省地质矿产勘查局 327 地质队, 合肥 230001

3. 铜陵有色金属集团控股有限公司, 铜陵 244000

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. No. 327 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Hefei 230001, China

3. Tongling Nonferrous Metals Group Holding Co., Ltd., Tongling 244000, China

2012-06-01 收稿, 2012-08-31 改回.

Yuan F, Zhou TF, Wang SW, Fan Y, Tang C, Zhang QM, Yu CH and Shi C. 2012. Characteristics of alteration and mineralization of the Shaxi porphyry copper deposit, Luzong area, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3099 – 3112

Abstract Shaxi is a large porphyry copper deposit located outside the Luzong volcanic basin in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River metallogenic belt. Before this study, geological investigations of wall rock alteration and mineralization characteristics of the deposit were minor, restricting application of these guides to exploration and to further study of the metallogenesis of the region. On the basis of previous work plus our detailed field observations and petrographic and mineralogical studies, we have characterized the magmatic rocks and their sequence of intrusion, the mineralogy of alteration (alteration type: potassic alteration, propylitization, feldspar-destructive alteration and kaolinization) and its zoning (from deep to shallow: potassic alteration, feldspar-destructive alteration and kaolinization), the characteristics of mineralization, the sequence of mineral deposition and the ore-forming stages (potassium silicate stage, quartz sulfide stage and quartz carbonate stage; the quartz sulfide stage can be further divided into quartz sulfide sub-stage and epidote-chlorite sub-stage). Based on the characteristics of alteration and mineralization at Shaxi, we find that the chalcopyrite began to precipitate in the late stage of the potassium silicate alteration, and reached a peak during the quartz sulfide sub-stage. The quartz carbonate stage also contributed some copper to the ore. The alteration and mineralization characteristics of Shaxi porphyry copper deposit are generally similar to porphyry deposits in different tectonic environments. The alteration zoning in Shaxi deposit is similar to that in deposits in continental marginal arcs and island arcs, and intracontinental collision post-orogenic extension environments, but the alteration at Shaxi is different from that at Dexing deposit, which occurs in an intraplate setting, but the ore types and mineralization are similar. Consequently, the tectonic setting may control the formation and evolution and the ore-bearing potential of magma, but the final emplacement depth of the magmatic rocks and the nature of their wall rocks control the alteration and mineralization characteristics of porphyry deposits.

Key words Alteration; Mineralization; Ore-forming stage; Shaxi porphyry copper deposit

摘 要 沙溪斑岩铜矿是长江中下游成矿带中部庐枞火山岩盆地外围的一个大型铜矿床。本文在前人工作基础上, 基于详细的野外观察和系统的岩相学、矿相学工作, 详细研究了矿床的蚀变特征及分带。结果表明, 矿床的蚀变类型有钾硅酸盐化、青磐岩化、长石分解蚀变和高岭土化, 从深到浅依次发育有钾硅酸盐化、长石分解蚀变叠加钾硅酸盐化、长石分解蚀变和高岭土化等蚀变。确定了矿化特征、矿物生成顺序并划分了成矿阶段, 即: 钾硅酸盐阶段、石英硫化物阶段和石英碳酸盐阶段, 其中, 石英硫化物阶段又可进一步分为石英硫化物亚阶段和绿帘石-绿泥石亚阶段。基于蚀变及矿化特征认为, 沙溪铜矿床的矿化始于钾硅酸盐阶段的晚期, 石英硫化物亚阶段是黄铜矿主要的沉淀阶段, 石英碳酸盐阶段也对成矿贡献了部分铜质。与世界上不同构造环境的典型斑岩铜矿床对比认为, 沙溪矿床总体上与这些矿床的蚀变、矿化特征类似; 与陆缘弧、岛弧、陆内碰撞造山后伸展环境矿床在矿体产出位置、蚀变分带方面相似; 而由于围岩性质的差异, 与板内环境的德兴矿床在矿

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(40830426、41172084、41172086)、中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121115)、国家“深部探测技术与实验研究专项计划”专题(SinoProbe-03-02-05)、安徽省国土资源科技项目(2009-g-22, 2011-g-11)和新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0324)联合资助。

第一作者简介: 袁峰, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yf_hfut@163.com

体位置、蚀变分带方面存在差异,但是二者在脉体类型特别是与矿化关系密切的脉体特征上较为一致。因此,对于斑岩型矿床而言,构造背景可能控制了其岩浆的形成、演化以及含矿性,而岩浆岩最终定位的深度、围岩等条件则控制了其蚀变、矿化特征。

关键词 蚀变; 矿化; 成矿阶段; 沙溪斑岩型铜矿

中图法分类号 P618.41

1 引言

长江中下游成矿带是我国重要的金属成矿带之一,从西向东可分鄂东南、九瑞、安庆-贵池、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等七大矿集区(图1a)。前人在该成矿带进行了大量研究,在矿床的分布特征、构造背景、岩浆岩性质、岩浆源区、成矿流体特征、成岩成矿年代、矿床成因以及区域成矿特征等方面取得了丰硕成果(常印佛等,1991;唐永成等,1998;吴言昌等,1999;邢凤鸣等,1996;Wang *et al.* 2006;储国正,2003;陈江峰等,2001;李进文等,2007;张智宇等,2010;谢桂青等,2006,2008,2009;Zhou *et al.* 2007;周涛发等,2005,2008,2011;Mao *et al.* 2011;史大年等,2012)。沙溪斑岩铜矿位于长江中下游成矿带中段庐枞矿集区西北缘(图1a),为典型的板内环境斑岩型矿床(侯增谦等,2007)。自1977年发现以来,前人对该矿床的矿床地质特征(安徽省地质矿产局327地质队和南京大学地球科学系,1995^①)、岩浆岩侵入序次(任启江等,1991)、控矿构造(任启江等,1991)、成岩成矿时代(傅斌等,1997;徐文艺等,1999;徐兆文等,2000;Wang *et al.* 2006;杨晓勇,2006)、含矿岩体成因(Wang *et al.* 2006;杨晓勇,2006;Sun *et al.* 2010;Mao *et al.* 2011)、成岩成矿地球动力学背景(吕庆田等,2004;Wang *et al.* 2006;Sun *et al.* 2010;Mao *et al.* 2011;Yuan *et al.* 2011;史大年等,2012)等开展了大量研究。2008年以来对矿区实施的详查找矿工程表明,沙溪斑岩铜矿的储量已达大型规模,其深、边部还具有很大的找矿潜力。对于新的找矿工程所揭示的大量现象和信息,目前急需开展相关的矿床学研究,特别是矿床地质特征的研究,以阐明板内环境斑岩型矿床的控矿因素和成矿规律。因此,本文在前人工作基础上,基于详细的野外观察和系统的岩相学和矿相学工作,开展沙溪斑岩型铜矿床的蚀变及矿化特征研究,为找矿勘探工作以及进一步的成矿作用研究提供基础资料,并与世界上不同构造环境的典型斑岩型矿床进行对比。

2 矿区地质特征

2.1 地层

沙溪地区地层属于扬子地层区中的下扬子地层分区(常印佛等,1991;任启江等,1991)。矿区出露地层主要有志留系、侏罗系、白垩系及第四系,其中,志留系、侏罗系主要出露于矿区中部,白垩系零星分布在矿区西南和东南边部的地势

低平处,早白垩世陆相火山岩主要分布于矿区的西北和东南部,该火山岩系不整合覆盖于侏罗系之上,并被后期的白垩系不整合覆盖(图1b)。

2.2 构造

矿区内的构造以褶皱和断裂为主,可分为印支期和燕山期两期。以早侏罗世地层不整合界面为界,将前侏罗纪地层(以志留系为主)组成的褶皱构造划为印支期,侏罗纪以后包括白垩纪火山岩系在内地层所组成的构造划为燕山期。印支期区主要发育以志留系高家边组、坟头组组成的一系列北北东向、南西倾伏的复式褶皱构造,主要有棋盘山向斜和铜泉山背斜(图1b),是区域葛蒲山-盛桥复式背斜的组成部分。铜泉山背斜是区内的主要褶皱,位于铜泉山一带,轴面走向北北东向,近轴部岩层陡立,轴面往南东倾斜,北西翼地层较陡,一般倾角 60° 以上,部分直立或倒转;南东翼稍缓,多在 50° 以上,近轴部岩层陡立,显示强烈挤压特征,并被岩体侵位。该背斜因受侏罗纪地层超覆沉积、断裂破坏及岩体侵入影响,形态已不完整。棋盘山向斜位于棋盘山-虎皮山附近,核部为志留系坟头组,两翼为高家边组,除东侧外,三面为断层所切割,轴向北东 30° 左右,北端上翘,向南西倾伏。区内断裂可归并为四组(图1b),即近东西向、北东向、北北东向和北西向,其中北北东向断裂最为发育,北东向断裂次之。

2.3 岩浆岩

矿区岩浆岩非常发育,岩浆活动主要集中于早白垩世(傅斌等,1997;徐文艺等,1999;徐兆文等,2000;杨晓勇,2006;Wang *et al.* 2006)。侵入岩岩石类型较多,主要有粗斑石英闪长斑岩、中斑石英闪长斑岩、细斑石英闪长斑岩、黑云母石英闪长斑岩,其次还有闪长玢岩、角砾状闪长斑岩、辉绿岩脉岩等(图2)。火山岩主要在矿区西北侧福泉山一带和东南部出露,主要为安山斑岩、熔岩、凝灰角砾岩等。地表上由数十个大小不一、形态不规则的出露体,呈北北东向,向北撒开,向南收敛的特点分布(图1b)。中细斑石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩是主要的赋矿岩石(图2)。

粗斑石英闪长斑岩 深灰色,斑状结构,块状构造。斑晶主要成分有斜长石和角闪石等组成,斜长石斑晶大小一般

① 安徽省地质矿产局327地质队,南京大学地球科学系. 1995. 庐江地区铜铁矿勘查研究. “八五”国家科技攻关计划专题成果报告

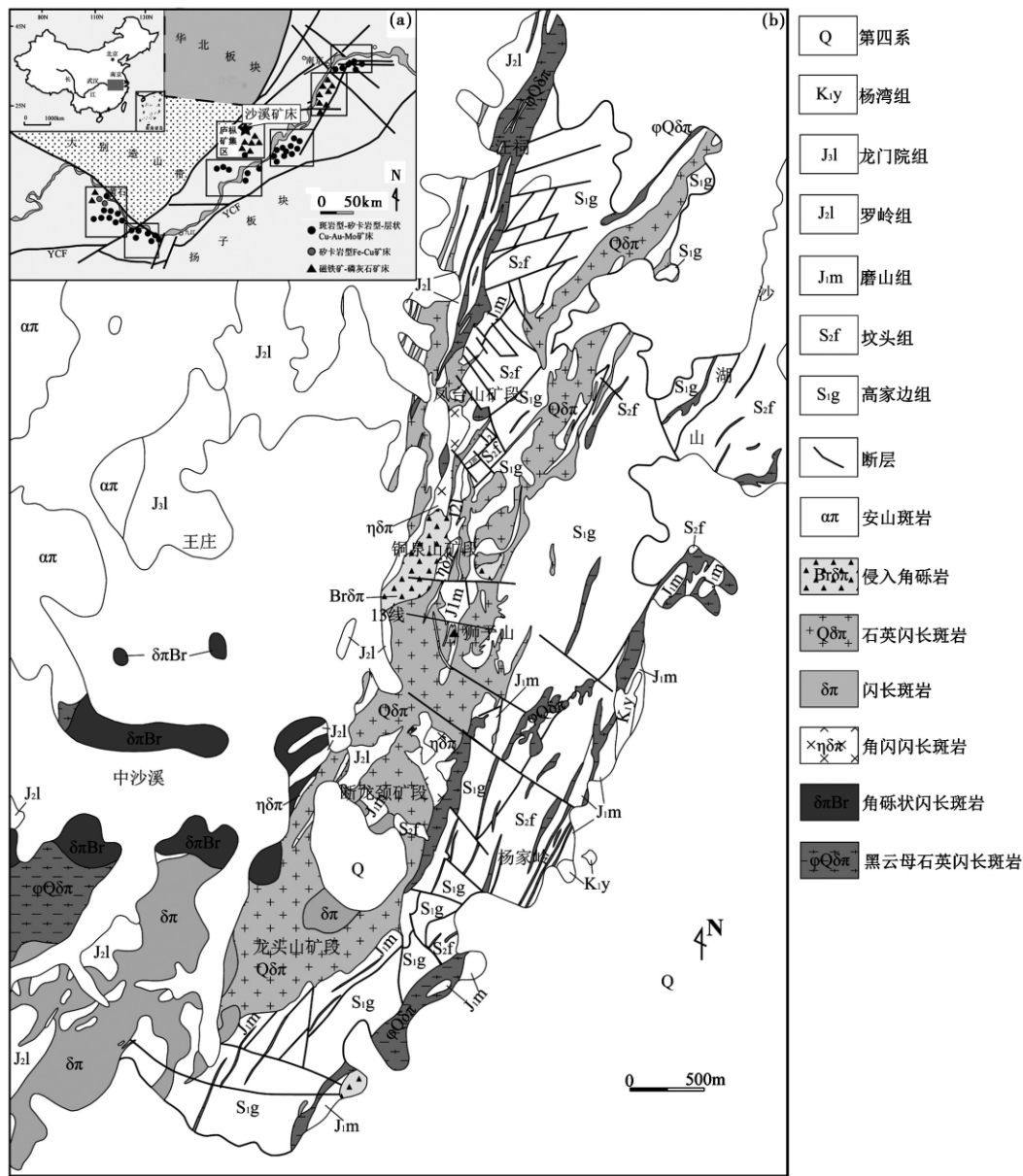


图1 研究区地质略图

(a) 长江中下游成矿带矿床分布图(据 Pan and Dong, 1999; Mao *et al.*, 2011 修改), TLF-郟城-庐江断裂; XGF-襄樊-广济断裂; YCF-阳新-常州断裂; (b) 沙溪斑岩铜矿床地质图(据安徽省地质矿产局 327 队和铜陵有色金属集团控股有限公司 2010^①修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

(a) -map showing the distribution of deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt (modified after Pan and Dong, 1999; Mao *et al.*, 2011): TLF-Tancheng-Lujiang fault; XGF-Xiangfan-Guangji fault; YCF-Yangxing-Changzhou fault; (b) -geologic map of Shaxi porphyry copper deposit

为 2.5 ~ 8.0mm, 基质由微细粒长石和少量石英、角闪石等组成(部分石英为次生), 发育浸染状黄铁矿化(图 2a)。

中斑石英闪长斑岩 新鲜呈灰黑色、深绿灰色, 斑状、似斑状结构, 块状构造。斑晶主要为斜长石、角闪石、石英、少量黑云母等。斜长石斑晶大小一般为 0.5 ~ 3.0mm, 个别小

至 0.25mm, 大小不均, 基质由更长石及少量的钠长石、石英、角闪石、黑云母、碳酸盐等组成, 发育钾硅酸盐化、青磐岩化(图 2b)和长石分解蚀变。在石英闪长斑岩与地层和粗石英闪长斑岩接触的地段, 长石斑晶变小(斑晶大小为 0.3 ~ 2.0mm), 岩性转变为细斑石英闪长斑岩(图 2c)。

① 安徽省地质矿产局 327 队和铜陵有色金属集团控股有限公司. 2010. 安徽省庐江县沙溪铜矿区地形地质图

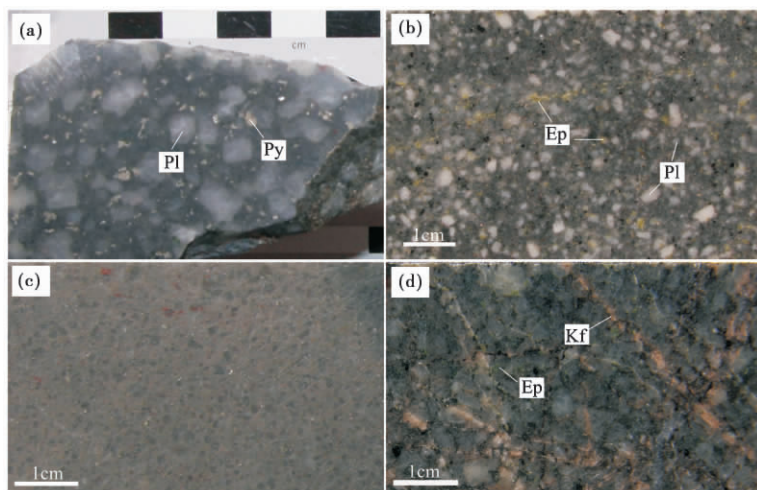


图2 沙溪斑岩型铜矿床中主要岩浆岩特征

(a) -粗斑石英闪长斑岩,发育浸染状黄铁矿化;(b) -中斑石英闪长斑岩,发育细脉状和浸染状绿帘石化;(c) -细斑石英闪长斑岩,发育浸染状黄铁矿化、黄铜矿化;(d) -黑云母石英闪长斑岩,发育网脉状钾长石化和浸染状绿帘石化。Ep-绿帘石;Kf-钾长石;Pl-斜长石;Py-黄铁矿

Fig. 2 Characteristics of the major magmatic rock in Shaxi porphyry deposit

(a) -coarse phenocryst quartz diorite porphyry with disseminated pyrite; (b) -middle phenocryst quartz diorite porphyry with veinlets and disseminated epidote; (c) -small phenocryst quartz diorite porphyry with disseminated pyrite and chalcopyrite; (d) -biotite quartz diorite porphyry, with veinlets K-feldspar and disseminated epidote. Ep-epidote; Kf-K-feldspar; Pl-plagioclase; Py-pyrite

黑云母石英闪长斑岩 新鲜呈深灰色、绿灰色,中-细粒斑状结构,块状构造,斑晶主要为斜长石、角闪石、石英、黑云母等。黑云母斑晶含量约5%,常蚀变为白云母、绿泥石、碳酸盐等矿物。基质部分变化较大,多数由微细粒长石和少量石英等矿物组成,常发育钾硅酸盐化(图2d)、青磐岩化等蚀变。

2.4 矿体特征

沙溪斑岩型铜矿床共分为四个矿段,自南而北依次为龙头山矿段、断龙颈矿段、铜泉山矿段及凤台山矿段,其中凤台山矿段和铜泉山矿段为主要的矿化富集地段(图1b)。

铜泉山矿段由四个矿体组成,最大的铜矿体主要赋存在石英闪长斑岩内,少量赋存在岩体上部外接触带的泥质粉砂岩中。主要矿体的形态复杂。矿体总体走向 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$,倾向南东东,倾角 $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。矿体长884m,宽49~483m;剖面上总体呈不规则的似层状、透镜状,矿体头部和尾部经常有分叉现象。铜泉山矿段的次要矿体位于主要矿体之下,主要赋存在石英闪长斑岩岩体内。矿体总体走向 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$,倾向南东东,倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。矿体走向南北,长554m,宽44~461m,平均宽169.7m;剖面上呈不规则的透镜状、局部为似层状。

凤台山矿段由两个矿体组成,最大的铜矿体主要赋存在石英闪长斑岩岩体内,少量赋存在岩体上接触带的泥质粉砂岩及其捕虏体中。矿体形态较复杂,剖面上总体呈不规则的似层状、透镜状,矿体头部和尾部因不均匀矿化而出现分叉现象。矿体总体走向 $32^{\circ} \sim 38^{\circ}$,倾向北西西,倾角 $40^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 。

矿体长约655m,宽122~346m,平均宽252.5m。凤台山矿段次要矿体位于主要矿体之上,全部赋存在石英闪长斑岩岩体内。矿体剖面上呈不规则的似层状,局部为透镜状。矿体总体走向 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,倾向北西西,倾角 $42^{\circ} \sim 59^{\circ}$ 。矿体长544m,宽949~359m,平均宽207m。

沙溪斑岩型铜矿床中的矿石类型主要包括含铜石英闪长斑岩和含铜砂岩。矿床中目前已发现的矿物种类约40余种。金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿,其次为磁铁矿、赤铁矿、辉钼矿、菱铁矿等,少(微)量自然金、自然银、银金矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、蓝铜矿、软锰矿等。非金属矿物主要有斜长石、钾长石、石英,其次为钠长石、绢云母、绿泥石、方解石等,少量硬石膏、黑云母、绿帘石、重晶石、磷灰石、锆石、榍石、绿帘石、高岭石、透辉石、电气石等。矿石结构主要为自形晶粒状结构、半自形-他形粒状结构、网脉状交代结构、固溶体出溶结构等;矿石构造主要有脉状构造、网脉状构造、角砾状构造、细脉浸染状构造等。

3 蚀变特征

沙溪斑岩型铜矿床发育有斑岩型矿床典型的围岩蚀变:钾硅酸盐化、青磐岩化、石英绢云母化和高岭土化,晚期的石英绢云母化和粘土化在空间上很难分清楚,可合并为长石分解蚀变(Ulrich *et al.*, 2001; 杨志明等, 2008),不同类型的蚀变在空间上具有明显的分带现象(图3)。

3.1 钾硅酸盐化

钾硅酸盐化主要发育在矿床中深部,蚀变强弱不同,蚀

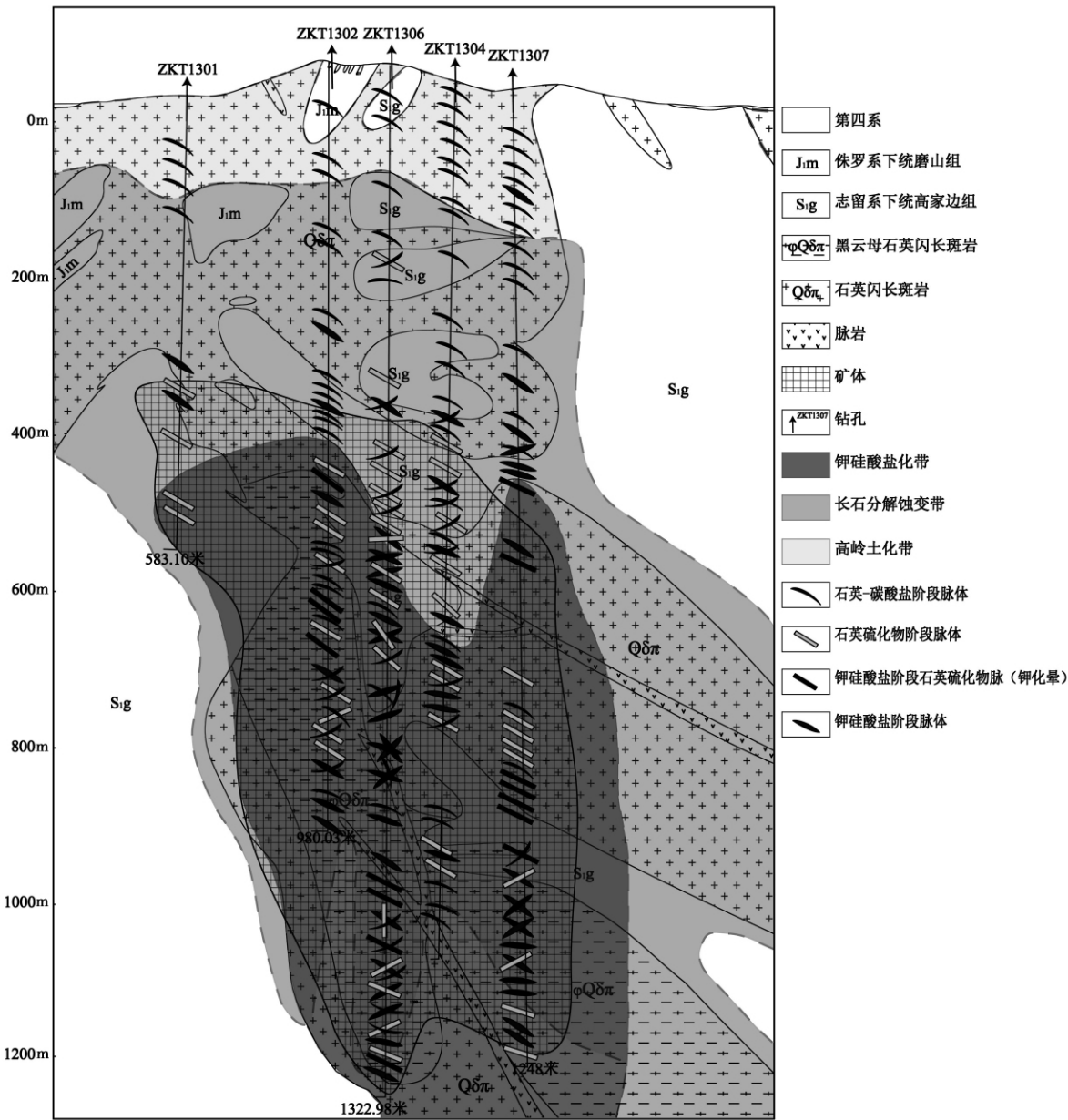


图3 沙溪斑岩型铜矿床 13 号勘探线蚀变带及脉体分布图
Fig. 3 Alteration zone and veins map of 13 prospecting line in Shaxi porphyry deposit

变矿物分布不均;在铜泉山矿段中表现相对完整,凤台山矿段为断续出现。钾硅酸盐化以钾长石、黑云母等含钾矿物的发育为特征,同时伴随硬石膏、磁铁矿等矿物的广泛发育,钾长石化与黑云母化分布并不完全套合。

钾长石化主要表现为三种形式,分别为弥漫状(图 4a)、脉状(图 2h、图 5a)及脉体晕的形式(图 4b、图 5a, d)。弥散状钾长石化分布范围较小,主要发育在岩体深部,表现为基质中长石类矿物和的钾长石化。斜长石斑晶也经常被钾长石交代,当交代较弱时,钾长石化沿着斜长石斑晶的边缘、解理、双晶缝和裂隙发生(图 4b),使斜长石斑晶镶边状、云雾状结构。正交偏光下,因次生钾长石和原生斜长石斑晶光学

性质不一致(钾长石显深色),可见原生长石斑晶被交代成港湾状。有的斜长石发生钾质交代形成反条纹长石。随着钾化作用的增强,使斜长石大部分蚀变为次生钾长石,残留的少量斜长石发生绢云母化(图 4b)。次生钾长石多被晚期的泥化和碳酸盐蚀变叠加(图 4l)。脉状钾长石化主要表现为钾长石脉(图 5a)和石英-钾长石脉(图 5c),钾长石脉呈不规则细脉状,脉体通常较细(0.5~5mm),脉体常穿切岩石中斜长石斑晶,石英-钾长石脉中钾长石常呈线状分布于脉体中心。脉体晕是沙溪斑岩型铜矿床中主要的钾长石化类型,主要表现为石英脉体边缘的长石边缘被交代,形成钾长石镶边(图 4b),石英脉中常含有少量黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿和

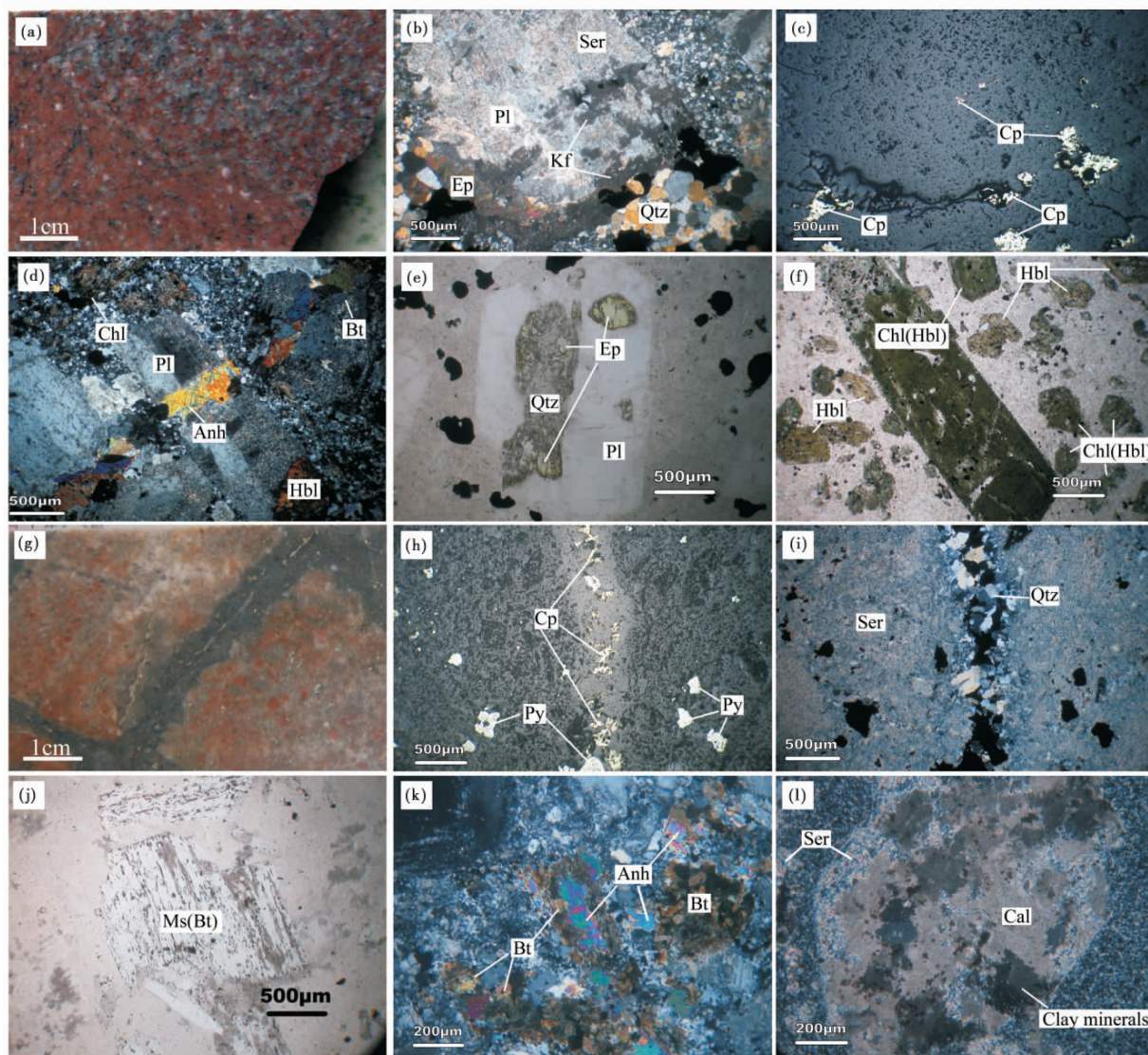


图4 沙溪斑岩型铜矿床不同类型的蚀变特征

(a) -弥散状钾长石化,部分岩石残留没有发生钾长石化(灰白色部分);(b) -斜长石斑晶整体发生弱的绢云母化,石英-黄铜矿脉旁和浸染状黄铜矿旁斜长石发生钾长石化(深色),绿帘石叠加脉旁钾长石上(正交偏光);(c) -图b的反射光照片;(d) -岩石中发育黑云母-硬石膏脉和绿泥石化蚀变(正交偏光);(e) -绿帘石和石英交代长石斑晶(单偏光);(f) -绿帘石交代角闪石,个别角闪石已经完全蚀变为绿帘石,但仍保留角闪石晶形(单偏光);(g-i) -岩石整体钾长石化,发育石英-黄铜矿-黄铁矿脉,黄铜矿和黄铁矿呈线状分布于脉体中心,被后期长石分解蚀变叠加,使脉体中的石英破碎成较小颗粒的石英,脉体边缘的长石也发生硅化,形成细粒石英(h,i:图g的反射光和正交偏光照片);(j) -岩石中黑云母完全蚀变为白云母,仍保留黑云母的晶形(单偏光);(k) -岩石发生黑云母化,热液黑云母呈细小片状不同方向堆积,被晚期硬石膏交代(正交偏光);(l) -长石斑晶蚀变为绢云母、碳酸盐和粘土矿物,仍保留长石斑晶的晶形(正交偏光). Anh-硬石膏; Bt-黑云母; Cal-碳酸盐; Chl-绿帘石; Chl(Hbl)-角闪石完全蚀变为绿帘石,但仍保留角闪石晶形; Ep-绿帘石; Kf-钾长石; Ms(Bt)-黑云母完全蚀变为白云母,但仍保留黑云母的晶形; Cp-黄铜矿; Hbl-角闪石; Pl-斜长石; Py-黄铁矿; Qtz-石英; Ser-绢云母

Fig. 4 Different types of alteration features in Shaxi porphyry deposit

(a) -dispersion-shaped potassic alteration, part of rock doesn't develop potassic alteration (the gray part); (b) -plagioclase phenocrysts overall develop weak sericitization, the plagioclase phenocrysts around quartz-chalcopyrite vein and disseminated chalcopyrite have potassic alteration (the dark part). The K-feldspar around the vein is partly epidotized by epidote (CPL); (c) -reflected light photo of Fig. b; (d) -the rock develop biotite-anhydrite vein and chloritization (CPL); (e) -plagioclase phenocrysts are partly replaced by epidote and quartz (PPL); (f) -hornblende phenocrysts are partly replaced by chlorite. Several hornblende phenocrysts are completely replaced by chlorite, and still retain the hornblende crystal sharp (PPL); (g-i) -the rock overall develop potassic alteration and quartz-chalcopyrite-pyrite vein. The chalcopyrite and pyrite distribute in the middle of the vein, which is overlay by feldspar-destructive alteration. The quartz in the vein and the feldspar along the vein break into smaller particles quartz (h, i: RPL and CPL of Fig. g); (j) -biotite is completely replaced by Ms, and still retain the biotite crystal sharp (PPL); (k) -the rock develop hydrothermal biotites, which are small particles, accumulating in different directions. Hydrothermal biotites are partly replaced by Anhydrite (CPL); (l) -plagioclase phenocrysts develop alteration of sericite, carbonate and clay minerals, and still retain the plagioclase crystal sharp (CPL). Anh-anhydrite; Bt-biotite; Cal-carbonate; Chl-chlorite; Chl(Hbl)-hornblende completely altered to chlorite, but still retain the hornblende crystal sharp; Ep-epidote; Kf-K-feldspar; Ms(Bt)-biotite completely altered to muscovite, but still retain the biotite crystal sharp; Cp-chalcopyrite; Hbl-hornblende; Pl-plagioclase; Py-pyrite; Qtz-quartz; Ser-sericite

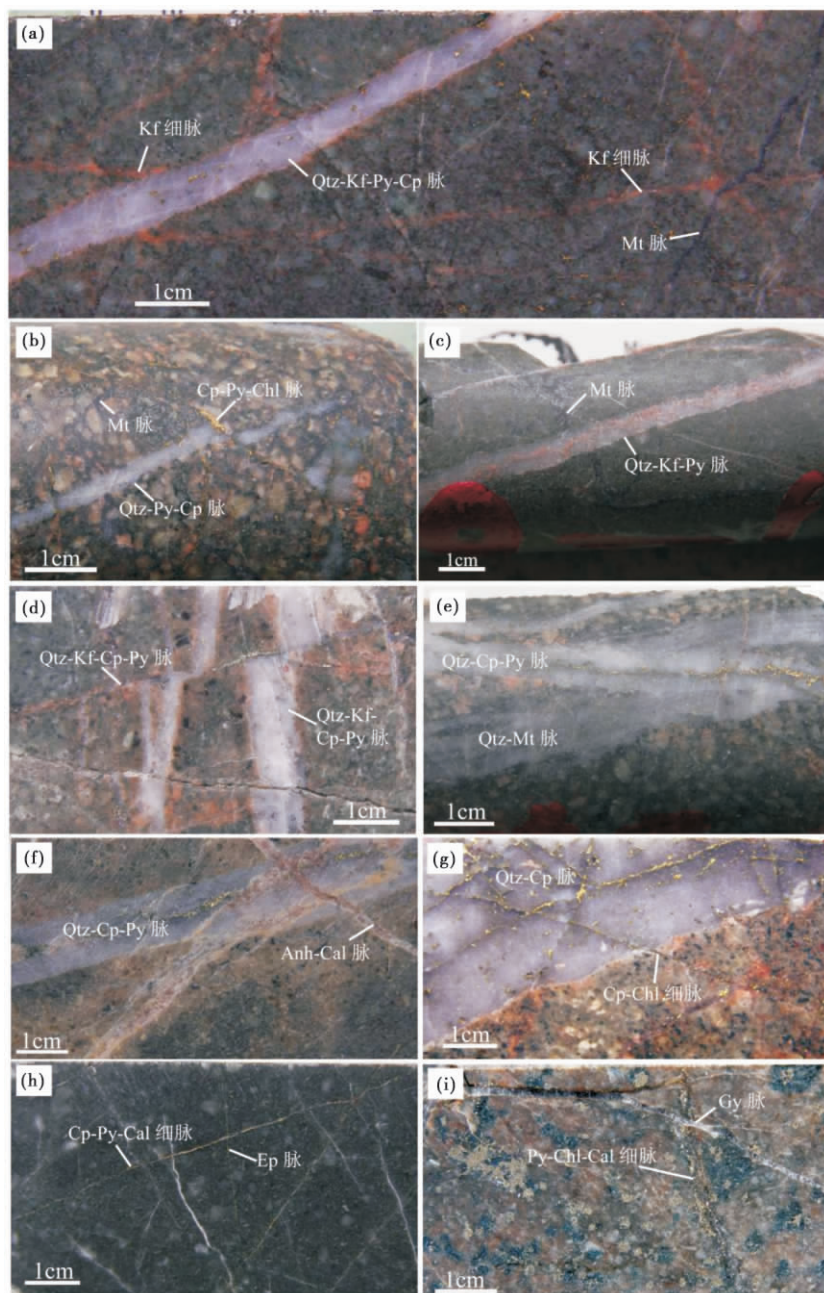


图5 沙溪斑岩型铜矿床各种脉体特征及相互关系

(a) -石英-钾长石-黄铁矿-黄铜矿脉穿切磁铁矿细脉和钾长石细脉, 磁铁矿脉穿切钾长石脉; (b) -黄铜矿-黄铁矿-绿泥石脉穿切石英-黄铁矿-黄铜矿脉和磁铁矿网脉, 石英-黄铁矿-黄铜矿脉穿切磁铁矿网脉; (c) -石英-钾长石-黄铁矿脉穿切磁铁矿脉; (d) -石英-钾长石-黄铜矿-黄铁矿脉穿切石英-钾长石-黄铜矿-黄铁矿脉; (e) -石英-黄铜矿-黄铁矿脉穿切石英-磁铁矿脉; (f) -硬石膏-碳酸盐穿切石英-黄铜矿-黄铁矿脉; (g) -黄铜矿-绿泥石脉穿切石英-黄铜矿脉; (h) -黄铜矿-黄铁矿-碳酸盐脉穿切绿帘石脉; (i) -石膏穿切黄铁矿-绿泥石-碳酸盐脉。Anh-硬石膏; Bt-黑云母; Bn-斑铜矿; Cal-碳酸盐; Chl-绿泥石; Clay-粘土矿物; Cp-黄铜矿; Ep-绿帘石; Gy-石膏; Kf-钾长石; Mt-磁铁矿; Mo-辉钼矿; Py-黄铁矿; Qtz-石英; Ser-绢云母

Fig. 5 Characteristics of the various veins and the relationship between them in Shaxi porphyry deposit

(a) -quartz-K-feldspar-pyrite-chalcopryrite vein cut magnetite veinlet and K-feldspar veinlet, and magnetite veinlet cut K-feldspar veinlet; (b) -chalcopryrite-pyrite-chlorite vein cut quartz-pyrite-chalcopryrite vein and magnetite veinlets, and quartz-pyrite-chalcopryrite vein cut magnetite veinlets; (c) -quartz-K-feldspar-pyrite vein cut magnetite veinlet; (d) -quartz-K-feldspar-chalcopryrite-pyrite vein cut quartz-K-feldspar-chalcopryrite-pyrite vein; (e) -quartz-chalcopryrite-pyrite vein cut quartz-magnetite vein; (f) -anhydrite-carbonate vein cut quartz-chalcopryrite-pyrite vein; (g) -chalcopryrite-chlorite vein cut quartz-chalcopryrite vein; (h) -chalcopryrite-pyrite-carbonate vein cut epidote vein; (i) -gypsum vein cut pyrite-chlorite-carbonate vein. Anh-anhydrite; Bt-biotite; Bn-bornite; Cal-carbonate; Chl-chlorite; Clay-clay mineral; Cp-chalcopryrite; Ep-epidote; Gy-gypsum; Kf-K-feldspar; Mt-magnetite; Mo-molybdenite; Py-pyrite; Qtz-quartz; Ser-sericite

硬石膏, 这些矿物在脉体中呈浸染状分布, 随着金属矿物的不断析出、沉淀, 金属矿物在脉体中呈线状连续或不连续分布。

黑云母化在矿床中不太发育, 手标本不易鉴别。镜下可见黑云母化主要表现为: 一是呈叶片状集合体, 成串珠、脉状充填于其他矿物之间(图4d), 脉中常伴随其他矿物, 如硬石膏、石英等; 二是热液黑云母呈鳞片状或叶片状集合体交代角闪石斑晶或堆积成团(图4k)。

3.2 青磐岩化

青磐岩化主要发育于矿床的浅部及外围, 属整个蚀变带的外带, 在形成时间上稍晚于钾硅酸盐蚀变, 该蚀变除局部稍强外, 普遍较弱。主要蚀变矿物为高岭土、绿泥石、绿帘石、绢云母(水云母)、碳酸盐, 局部有少许钠长石生成。代表矿物为绿帘石和绿泥石组合。其蚀变主要有三种形式, 分别为浸染状、团状、细脉状。浸染状青磐岩化常表现为绿帘石和绿泥石共同交代角闪石、斜长石和热液黑云母、钾长石等(图4b, e, f)。当交代较弱时, 被交代矿物部分蚀变为绿帘石或绿泥石(图4b, e), 当交代作用较强时, 矿物完全蚀变为绿帘石或绿泥石, 并保留矿物的假象(图4f)。脉状青磐岩化表现为绿帘石、或与绿泥石共生在一起组成脉体(图5h), 脉体中常含有石英、硬石膏、黄铁矿等, 有时会有少量黄铜矿。当裂隙较大时, 绿帘石可能会大量沉淀, 形成团块状绿帘石化。

3.3 长石分解蚀变

长石分解蚀变(石英-绢云母-绿泥石-粘土化)叠加在新鲜岩石以及早期蚀变组合上。蚀变矿物主要有石英、绢云母、绿泥石、高岭土、黄铁矿, 以及少量的碳酸盐、石膏等。蚀变主要有两种形式, 即以弥散状和脉体晕的形式。弥散状的长石分解蚀变主要发育在矿床的上部, 岩石蚀变较强, 使斑岩的结构遭受破坏, 显微镜下可见长石颗粒大部分被绢云母±碳酸盐±粘土矿物交代(图4i, l), 部分蚀变破碎成细粒石英(图4i), 基质中也有大量有微细粒的次生石英形成。黑云母和角闪石等暗色矿物被绿泥石、绢云母、白云母、石英、硬石膏(图4k)等交代。脉体晕形式的长石分解蚀变主要分布于绢云母化叠加钾化带发育, 绢云母、碳酸盐主要沿斜长石斑晶裂隙和双晶面交代。

长石分解蚀变常强烈叠加在钾硅酸盐化之上(图4g, i)。由于最晚侵位的脉岩也发生了长石分解蚀变, 因此该蚀变可能发生在矿区所有斑岩侵位之后。长石分解蚀变在矿床浅部以绢云母化发育为特征, 而在矿床深部绿帘石化明显增强, 岩石颜色明显发绿。

高岭土化主要出现在矿床的上部, 主要表现为长石等矿物蚀变为高岭石、伊利石等粘土矿物, 另外还有碳酸盐化、少量的绿帘石化等。

4 矿化特征

沙溪斑岩型铜矿床以浸染状和脉状矿化为特征, 脉体具有多样性、多期次的特征。对各种脉体(图5、表1)穿插关系的厘定有助于正确认识矿化阶段和成矿演化。

沙溪铜矿最早形成的脉体为钾长石细脉, 主要产于深部石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中。脉体不规则至板状, 多数脉宽0.5~5mm, 脉体通常主要由细粒钾长石组成, 弱粘土化, 当被晚期蚀变叠加时, 脉体的颜色会变淡, 有时会变为粉红色, 甚至白色, 常被后期的脉体穿切(图5a)。磁铁矿脉稍晚于钾长石细脉, 穿切早期钾长石脉(图5a), 也常被后期脉体穿切(图5b, c)。磁铁矿脉不规则, 宽约为0.2~2mm, 显微镜下可见部分磁铁矿被氧化为赤铁矿, 主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中, 主要分布于中深部破碎带或岩性发生变化的地方。黑云母脉数量较少, 不规则, 宽约为0.1~1mm之间, 脉体常伴有硬石膏和石英的产出, 主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中, 主要分布于中深部, 与其它脉体没有明显的穿插关系。在上述脉体边缘没有蚀变晕的出现, 也没有黄铜矿化出现, 均发育钾硅酸盐蚀变的代表矿物如磁铁矿、钾长石和热液黑云母等, 为钾硅酸盐阶段的脉体。

随后出现以石英和钾长石为主的脉体, 脉中也可见黑云母、硬石膏、黄铁矿、黄铜矿和磁铁矿等矿物。钾长石呈线状连续分布于脉体中心(图5c), 不规则至板状, 宽多介于0.5~2cm, 此时少量黄铜矿化开始在脉体中出现, 黄铜矿、黄铁矿等金属矿物常呈浸染状分布于脉体中。个别脉体中还发育有硬石膏, 主要产于深部的石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中, 脉体穿切早期的钾长石脉和磁铁矿±石英脉, 很少被后期脉体穿切。之后产出的石英-钾长石±硬石膏±黄铁矿±辉钼矿±黄铜矿±斑铜矿脉体中, 钾长石是以蚀变晕的形式发育在脉体的边缘, 脉体常呈不规则至板状, 宽多介于0.5~2cm, 有时可达5cm, 脉体中金属矿物呈浸染状或线状连续或断续分布于脉体中心(图5d)。这种脉较为发育, 主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中, 金属矿物呈线状分布的脉体稍晚于浸染状分布的脉体(图5d), 黄铜矿在脉体中的含量随着时间的推移不断增多, 该种脉体穿切早期钾长石和磁铁矿±石英脉, 常被晚期脉体穿切。上述脉体也都发育钾硅酸盐蚀变的代表矿物磁铁矿、钾长石和热液黑云母, 也属于钾硅酸盐阶段的脉体。

石英硫化物阶段共产出两种脉体, 分别为石英±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿±斑铜矿±辉钼矿脉(石英硫化物亚阶段)和绿帘石±石英±绿泥石±黄铁矿±黄铜矿脉(绿帘石-绿泥石亚阶段)。石英硫化物亚阶段的石英±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿±斑铜矿±辉钼矿脉体两侧常有白色的褪色晕, 脉宽2~15mm, 有时可达5cm, 金属矿物呈线状连续或不连续分布于脉体中心或边缘。这种脉大量发育, 是矿区铜矿化

表 1 沙溪斑岩铜矿的矿化阶段及其脉体特征

Table 1 Ore-forming stage , types and characteristics of the various veins and the relationship between them in Shaxi porphyry deposit

期次	类型	蚀变矿物	形态及规模	穿切关系和产出特征
钾硅酸盐阶段	钾长石脉	钾长石	不规则至板状,宽多在 0.5 ~ 5mm 之间	主要产于深部石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中,呈不连续细脉状分布,被后期脉体穿切
	黑云母 ± 硬石膏 ± 石英	黑云母	不规则,宽约为 0.1 ~ 1mm	主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中,主要分布于中深部,与其他脉体没有明显的穿插关系
	磁铁矿脉	磁铁矿	不规则,宽约为 0.2 ~ 2mm	主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中,主要分布于中深部,破碎带或岩性发生变化的地方,磁铁矿多被氧化,穿切早期钾长石脉,也常被后期脉体穿切
	石英-钾长石 ± 黑云母 ± 硬石膏 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿 ± Mt	钾长石或黑云母或磁铁矿	不规则至板状,宽多介于 0.5 ~ 2cm,钾长石呈连续分布于脉体中心,硬石膏、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿等硫化物呈浸染状分布于脉体中	该脉发育较少,主要产于深部的石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中,穿切早期的钾长石脉和磁铁矿 ± 石英脉,很少被后期脉体穿切
	石英-钾长石 ± 硬石膏 ± 黄铁矿 ± 辉钼矿 ± 黄铜矿 ± 斑铜矿	钾长石	不规则至板状,宽多介于 0.5 ~ 2cm,有时可达 5cm,钾长石呈晕状分布于脉体的边缘,金属矿物呈浸染状或线状连续或断续分布于脉体中心	该脉较为发育,主要产于石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中,金属矿物呈线状分布的脉体稍晚于浸染状分布的脉体,穿切早期钾长石和磁铁矿 ± 石英脉,常被晚期脉体穿切
石英硫化物阶段	石英 ± 硬石膏 ± 黄铜矿 ± 黄铁矿 ± 斑铜矿 ± 辉钼矿	脉体两侧有白色的褪色晕	板状,脉宽 2 ~ 15mm,有时可达 5cm,金属矿物呈线状连续或不连续分布于脉体中心或边缘	该脉大量发育,主要产于石英闪长斑岩中,少量产于黑云母石英闪长斑岩中,穿切早期的钾硅酸盐阶段的脉体,也被晚期脉体穿切
	绿帘石-绿泥石亚阶段 绿帘石 ± 石英 ± 绿泥石 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿	绿帘石	不规则至板状,脉宽多介于 1 ~ 2mm,部分绿帘石细脉中有少量的黄铜矿、黄铁矿,呈浸染状分布,脉中石英颗粒细小,含量较少	主要发育在石英闪长斑岩中,与早期脉体无明显的穿切关系,被晚期脉体穿切
石英碳酸盐阶段	黄铜矿-绿泥石 ± 石英 ± 黄铁矿	具有绢云母晕	连续的板状细脉,脉宽多小于 2mm,脉体边缘有绢云母晕和硅化蚀变	该脉较为发育,主要产于石英闪长斑岩中,分布于中上部,切穿早期的 Mt ± 石英脉和石英硫化物阶段的脉体
	黄铁矿 ± 石英 ± 绿泥石 ± 黄铜矿 ± 碳酸盐	石英 ± 碳酸盐 ± 绿泥石	连续的板状细脉,脉宽 0.1 ~ 4mm,脉体边缘具有硅化或绿泥石蚀变	大量发育,主要产于石英闪长斑岩中,穿切早期的石英硫化物阶段和钾硅酸盐化阶段的脉体
	黄铁矿-石英 ± 硬石膏 ± 碳酸盐	少量绢云母 ± 粘土矿物	连续板状,脉宽 8 ~ 60mm,石英、黄铁矿呈自形晶,颗粒粗大,充填于脉体中,局部出现硬石膏	主要产于石英闪长斑岩浅部,在粗斑石英闪长斑岩中发育少量石英-黄铁矿粗脉,主要分布于岩体上部
	石膏 ± 碳酸盐	绢云母 ± 粘土矿物 ± 碳酸盐	板状,1 ~ 10mm,少数可达 50mm	产于所有岩体之中,切穿上述所有脉体

最主要的产出形式,主要产于石英闪长斑岩中,少量产于黑云母石英闪长斑岩中,穿切早期钾硅酸盐阶段形成的脉体(图 5e),也可被晚期脉体穿切(图 5f, g)。该种脉体与钾硅酸盐阶段的晚期脉体(石英-钾长石 ± 硬石膏 ± 黄铁矿 ± 辉钼矿 ± 黄铜矿 ± 斑铜矿脉)十分相似,但脉体明显变宽,金属矿物含量更多。绿帘石-绿泥石亚阶段产出的绿帘石 ± 石英 ± 绿泥石 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿脉,不规则至板状,脉宽多介于 1 ~ 2mm,部分绿帘石细脉中有少量的黄铜矿、黄铁矿,呈浸染状分布,主要发育在石英闪长斑岩中,与早期脉体无明显的穿切关系,但被晚期脉体穿切(图 5h)。

石英碳酸盐阶段。石英碳酸盐阶段主要产出四种脉体,分别为黄铜矿-绿泥石 ± 石英 ± 黄铁矿脉、黄铁矿 ± 石英 ±

绿泥石 ± 黄铜矿 ± 碳酸盐脉、黄铁矿-石英 ± 硬石膏 ± 碳酸盐脉和石膏 ± 碳酸盐脉。黄铜矿-绿泥石 ± 石英 ± 黄铁矿脉多呈连续的细脉状产出,脉宽多小于 2mm,脉体边缘有绢云母晕和硅化蚀变,该种脉体较为发育,主要产于石英闪长斑岩中,分布于中上部,切穿早期的磁铁矿 ± 石英脉(图 5b)和石英硫化物阶段的脉体(图 5g, h),该种脉体也为矿床贡献了少量的铜。黄铁矿 ± 石英 ± 绿泥石 ± 黄铜矿 ± 碳酸盐脉也常呈连续的细脉状产出,脉宽 0.1 ~ 4mm,脉体边缘具有硅化或绿泥石蚀变,大量发育,主要产于石英闪长斑岩中,穿切早期的石英硫化物阶段和钾硅酸盐化阶段的脉体。黄铁矿-石英 ± 硬石膏 ± 碳酸盐脉则呈连续板状,脉宽 8 ~ 60mm,石英、黄铁矿呈自形晶,颗粒粗大,充填于脉体中,局部出现硬

石膏,主要产于石英闪长斑岩浅部,在粗斑石英闪长斑岩中发育少量石英-黄铁矿粗脉,主要分布于岩体上部。最晚阶段产出的石膏±碳酸盐脉,常伴有绢云母化、粘土化和碳酸盐化,脉体多呈板状,1~10mm,少数可达50mm,产于所有岩体之中,切穿上述所有脉体(图5f,i)。

伴随蚀变在空间上明显的分带,不同的脉体在空间上也有一定的分布规律(图3)。石英碳酸盐阶段的脉体分布范围较广,主要分布在岩体的上部;在岩体深部常穿插早期形成的脉体;钾硅酸盐阶段和石英硫化物阶段的脉体则较为集中,主要分布于岩体深部。

通过上述沙溪斑岩型铜矿床不同脉体之间的穿切关系和不同矿物之间的交代关系等,重新划分了沙溪斑岩型铜矿床的矿化阶段,包括钾硅酸盐阶段、石英硫化物阶段和石英碳酸盐阶段,其中,石英硫化物阶段又可分为石英硫化物亚阶段和绿帘石-绿泥石亚阶段,并根据每阶段发育的矿物厘定了沙溪斑岩型铜矿床主要矿物的生成顺序(表1、图6)。

成矿阶段 矿物名称	钾硅酸盐阶段	石英硫化物阶段	石英碳酸盐阶段
钾长石	—	—	—
黑云母	—	—	—
石英	—	—	—
硬石膏	—	—	—
钠长石	—	—	—
磁铁矿	—	—	—
黄铁矿	—	—	—
黄铜矿	—	—	—
斑铜矿	—	—	—
绿帘石	—	—	—
绿泥石	—	—	—
自然金	—	—	—
银金矿	—	—	—
金银矿	—	—	—
辉钼矿	—	—	—
方铅矿	—	—	—
赤铁矿	—	—	—
方解石	—	—	—
绢云母	—	—	—
菱铁矿	—	—	—
辉铜矿	—	—	—

图6 沙溪斑岩型铜矿床矿物生成顺序

Fig. 6 Paragenetic sequence of the Shaxi porphyry Cu deposit

5 讨论

5.1 矿化与蚀变的关系

邱检生等(1991)最早对沙溪铜矿的蚀变进行了研究,识别出硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化蚀变、钾硅酸盐-青磐岩化叠加蚀变、石英-绢云母化蚀变和青磐岩化蚀变;认为这些蚀变具有较明显的分带,从内向外依次为硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化蚀变带→钾硅酸盐-青磐岩化叠加蚀变带→石英-绢云母化蚀变带→青磐岩化蚀变。本文研究认为,沙溪斑岩型铜矿床发育的蚀变类型主要有钾硅酸盐化(钾长石化和黑云母化)、石英绢云母化、泥化、青磐岩化(绿帘石化和绿泥石

化)、黑云母化不太发育,深部的钾硅酸盐化常被石英绢云母化叠加,少量被绿帘石化叠加,矿床内石英绢云母化与泥化在空间很难分清楚,可合并为长石分解蚀变;蚀变在空间上具有一定的分带性,从深到浅发育钾硅酸盐化、长石分解蚀变叠加钾硅酸盐化、长石分解蚀变和高岭土化(图3),总体上与“二长岩”模式(Lowell and Guilbert, 1970)较为相似。

沙溪斑岩型铜矿床黄铜矿化应始于钾硅酸盐阶段的晚期,石英硫化物亚阶段是矿床中黄铜矿主要的沉淀矿化阶段,石英碳酸盐阶段也贡献了部分铜,石英硫化物阶段的主要含矿脉体与钾硅酸盐化晚期的含矿脉体矿物组成相似,这可能指示石英硫化物阶段的脉体可能形成于钾硅酸盐化向长石分解蚀变转变的阶段。矿床的矿化类型主要有浸染状和脉状矿化,浸染状黄铜矿化边部常发育有钾长石化(图4b,c);而脉状黄铜矿化主要表现为钾硅酸盐阶段的石英-钾长石±黑云母±硬石膏±黄铁矿±黄铜矿±Mt脉和石英-钾长石±硬石膏±黄铁矿±辉钼矿±黄铜矿±斑铜矿脉、石英硫化物阶段的石英±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿±斑铜矿±辉钼矿脉以及石英碳酸盐阶段的黄铜矿-绿泥石±石英±黄铁矿脉。其中石英碳酸盐阶段的脉体矿化则与长石分解蚀变关系密切,分布范围较广,主要集中在岩体上部,在岩体深部则常常穿切早期脉体(图3)。钾硅酸盐阶段和石英硫化物阶段的脉体矿化主要分布于岩体深部的钾硅酸盐化、长石分解蚀变叠加钾硅酸盐化的区域(图3),其中钾硅酸盐化石英硫化物脉(发育钾长石晕)和石英硫化物阶段的脉体分布区域与矿体的分布区域一致,也表明钾硅酸盐阶段和石英硫化物阶段贡献了沙溪斑岩型铜矿床绝大部分的铜的矿化。

5.2 与典型斑岩型矿床的对比

斑岩型矿床主要产于岛弧和陆缘弧环境,与大洋板片的俯冲密切相关。近年来的研究表明,斑岩型矿床也可以产于与俯冲无关的构造环境,如产于陆内碰撞造山环境的玉龙斑岩铜矿带和冈底斯斑岩铜矿带、产于板内环境的德兴斑岩铜矿(侯增谦等, 2007)。蚀变和矿化特征显示沙溪铜矿床具有斑岩型矿床的特征,成矿斑岩的年龄及庐枞地区早白垩世火山-侵入岩的形成背景(Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2011)限定了其产于板内环境。

本文选择典型的陆缘弧环境斑岩型矿床(美国西部 Bingham Canyon 矿床、安第斯山中部 Bajo de la Alumbrera 矿床)、岛弧环境斑岩型矿床(巴布亚新几内亚 Panguna 矿床、印度尼西亚 Batu Hijau 矿床)、陆内碰撞造山后伸展环境斑岩型矿床(西藏驱龙矿床)、板内环境斑岩型矿床(江西德兴矿床)与沙溪矿床进行对比(表2),可见:

(1) 沙溪矿床与其它矿床类似,与成矿关系密切的岩石都是中酸性浅成侵入岩。

(2) 各矿床的围岩性质各异,显示斑岩型铜矿对围岩不具明显的选择性,如岩浆弧环境(岛弧和陆缘弧)和陆内碰撞造山后伸展环境斑岩型矿床的围岩常为火山沉积岩,板内环

表2 沙溪矿床与世界上不同构造背景的典型斑岩型矿床对比表

Table 2 Compared with other porphyry deposits of different tectonic setting in the world

矿床	构造背景	与成矿关系密切的岩石类型	围岩	矿体位置	与矿化关系密切的脉体	蚀变分带	与矿体关系最密切的蚀变	资料来源
沙溪斑岩型铜矿床	板内环境	石英闪长斑岩	砂岩	主要分布在近接触带的岩体内	石英-钾长石±黑云母±硬石膏±黄铁矿±黄铜矿±磁铁矿、石英-钾长石±硬石膏±黄铁矿±辉钼矿±黄铜矿±斑铜矿、石英±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿±斑铜矿±辉钼矿(主要)、黄铜矿-绿泥石±石英±黄铁矿	从深到浅发育有: 钾硅酸盐化、长石分解蚀变叠加钾硅酸盐化、长石分解蚀变和高岭土化, 外围也发育有青磐岩化带	钾硅酸盐化	本文
美国西部 Bingham Canyon 矿床	陆缘弧环境	石英二长斑岩	石英岩、钙化石英岩、灰岩	主要分布在近接触带的岩体内	斑铜矿-黄铜矿脉(发育早期黑云母晕)代表硫化物最早的沉淀阶段、与钾硅酸盐化相关的早期石英±钾长石±硫化物脉体, 最主要是钾硅酸盐阶段晚期的石英-硫化物±钾长石网状细脉	内部钾硅酸化带、外部青磐岩化带, 绢英岩化和中级泥化叠加两者之上	钾硅酸盐化	Redmond and Einaudi, 2010; Lanier <i>et al.</i> , 1978
安第斯山中部的 Bajo de la Alumbrera 矿床	陆缘弧环境	英安质岩石	安山岩、火山碎屑岩	主要分布在近接触带的岩体内	石英-黄铜矿±磁铁矿±黄铁矿±黑云母±钾长石(主要)、石英-黄铜矿-硬石膏(绿泥石-伊利石晕)	中心发育钾硅酸盐化蚀变, 外部发育青磐岩化、中级泥化叠加在两者过渡部位, 之后绢英岩化叠加发育	钾硅酸盐化	Proffett, 2003; Harris <i>et al.</i> , 2005
巴布亚新几内亚 Panguna 矿床	岛弧环境	石英闪长岩-花岗闪长岩	玄武质-安山质火山岩	主要分布在近接触带的岩体内	石英硫化物脉(硫化物呈浸染状)和钾长石-石英-黑云母-黄铜矿-斑铜矿-磁铁矿网脉和石英-黄铜矿脉±辉钼矿脉贡献大量的铜	中心发于闪石-磁铁矿化和钾硅酸盐化、外围发育青磐岩化, 之后长石分解蚀变叠加	钾硅酸盐化	Fountain, 1972; Ford, 1978
印度尼西亚 Batu Hijau 矿床	岛弧环境	石英闪长斑岩	变火山岩	主要分布在近接触带的岩体内	磁铁矿-石英±黄铜矿±斑铜矿±方辉铜矿网脉(贡献80%的铜)、石英±磁铁矿±黄铜矿±斑铜矿脉、黄铁矿±石英±黄铜矿脉	中心为钾硅酸盐化、外围为青磐岩化, 绢英岩化和破碎控制的中级泥化带叠加, 泥化和高级泥化带发育在近地表	钾硅酸盐化	Meldrum <i>et al.</i> , 1994; Garwin, 2002
西藏驱龙矿床	陆内碰撞造山后伸展环境	花岗闪长岩、二长花岗斑岩	中酸性火山岩、火山碎屑岩、花岗斑岩	主要分布在近接触带的岩体内	黄铜矿±黑云母脉(贡献60%铜)、石英-辉钼矿±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿(主要贡献钼, 还伴有大量的铜)	中心为钾硅酸盐化、外围青磐岩化、长石分解蚀变叠加在早期蚀变组合和新鲜岩石上	钾硅酸盐化	杨志明等, 2007
江西德兴矿床	板内环境	花岗闪长斑岩	变质沉凝灰岩、千枚岩和凝灰质千枚岩	分布在岩体与围岩接触带附近, 围岩中矿体比岩体中大	B脉(石英±黄铁矿±辉钼矿、石英-黄铁矿±黄铜矿、乳白色石英脉、石英-黄铜矿±辉钼矿±斑铜矿)、D脉(黄铁矿-黄铜矿±石英、石英-黄铁矿、黄铁矿-黄铜矿±石英), B脉矿床为主要矿化阶段	以接触带为中心向外依次有硅化带→石英绢云母化带→绿泥石(绿帘石)水白云母化带→绿泥石(绿帘石)伊利石化带, 碳酸盐化出现在矿床的浅部, 硫酸盐化出现在矿床的深部	石英绢云母化	潘小菲等, 2009; 侯增谦等, 2007; 朱训等, 1983

境的矿床为变质岩(德兴矿床)和砂岩(沙溪矿床)。

(3) 各矿床的矿体赋存位置存在差异, 沙溪矿床与岩浆弧环境和陆内碰撞造山后伸展环境环境矿床相似, 矿体主要赋存在岩体内部, 但德兴矿床的矿体主要分布在围岩中。其原因可能为: 要形成具有经济意义的矿床, 必须要求流体的大量出溶(Richards 2005), 流体开始从岩浆中出溶时, 常以较小的气泡产出(Candela, 1991, 1997), 此时岩浆粘性较强且存在结晶相, 气泡很难逃逸(Cloos 2001); 这些富流体的岩浆常对流上升至岩浆房顶部, 随着岩浆的上升导致压力相应降低, 出溶的气泡则不断变大最终连在一起, 在斑岩顶部冷

凝的外壳不断富集形成流体的外壳 (Whitney, 1975; Burnham, 1979; Harris *et al.* 2004); 当流体富集到一定程度, 挥发份的压力大于围岩的静岩压力, 产生爆破从而压力急剧降低, 成矿物质开始沉淀; 因此, 矿体常常赋存于岩体与围岩接触带附近的岩体内部。德兴矿床的矿体大部分赋存于围岩中, 是由于围岩裂隙发育, 挥发份会从围岩裂隙中逃逸、沉淀, 并且围岩提供了部分成矿物质 (朱训等, 1983)。对于沙溪矿床而言, 其围岩为砂岩, 由于渗透性差, 可以阻止含矿热液的无限扩散, 有助于矿液在岩体顶部或靠近接触带的部位即沉淀下来形成矿石, 使得矿体主要赋存在接触带岩体内。

(4) 沙溪矿床发育的脉体类型与其它典型矿床基本一致, 但各类脉体的比例不尽相同, 因此矿床内贡献金属量最大的脉体类型也不完全相同; 岩浆弧环境和陆内碰撞造山后伸展环境矿床中贡献金属量最大的脉体常为钾硅酸盐化阶段的脉体, 而沙溪矿床中贡献最大的脉体为钾硅酸盐化向长石分解蚀变转化阶段的脉体, 与德兴矿床较为相似。

(5) 沙溪矿床的蚀变类型与其它典型矿床基本一致; 蚀变分带与岩浆弧环境和陆内碰撞造山后伸展环境相似, 中心发育钾硅酸盐化带、外围发育青盘岩化带、晚期泥化和绢英岩化 (长石分解蚀变) 叠加在前期蚀变之上, 与德兴矿床存在一定差异。沙溪矿床相比其它典型矿床, 泥化和青盘岩化不是太发育, 可能是由于围岩砂岩比较稳定, 不容易发生蚀变, 导致晚期蚀变都叠加在早期蚀变之上; 而岩浆弧环境和陆内碰撞造山后伸展环境矿床的围岩为火山沉积岩, 相对较容易发生蚀变。

(6) 沙溪矿床与岩浆弧环境和陆内碰撞造山后伸展环境矿床的矿体主要分布在钾硅酸盐带内, 可能暗示铜在钾硅酸盐化阶段沉淀 (Harris *et al.* 2003), 通常认为钾硅酸盐蚀变的铜、金矿化是通过岩浆卤水形成的 (Gammons and Williams-Jones, 1997); 德兴矿床的矿体主要分布在石英绢云母化带内, 与其围岩具有很好的容矿空间有关 (朱训等, 1983), 成矿流体都运送到围岩中沉淀下来, 而钾硅酸盐化主要发育在岩体内部, 因此矿体不是赋存在钾硅酸盐化带中。

6 结论

(1) 沙溪斑岩型铜矿床从深到浅发育有钾硅酸盐化、长石分解蚀变叠加钾硅酸盐化、长石分解蚀变和高岭土化等蚀变类型; 成矿阶段包括钾硅酸盐阶段、石英硫化物阶段和石英碳酸盐阶段, 其中石英硫化物阶段可进一步分为石英硫化物亚阶段和绿帘石-绿泥石亚阶段。

(2) 沙溪斑岩型铜矿床的矿化始于钾硅酸盐阶段的晚期, 石英硫化物亚阶段是黄铜矿主要的沉淀阶段, 石英碳酸盐阶段也对成矿贡献了部分铜质。

(3) 沙溪矿床与陆缘弧、岛弧、陆内碰撞造山后伸展环境矿床在矿体位置、蚀变分带方面相似; 而由于围岩性质的差异, 与板内环境的德兴矿床在矿体位置、蚀变分带方面存在

差异, 但是二者在脉体类型特别是与矿化关系密切的脉体特征上较为一致。斑岩型矿床的构造背景可能控制了其岩浆的形成、演化以及含矿性, 而岩浆岩最终定位的深度、围岩等条件则控制了其蚀变和矿化的特征。

致谢 本文的研究工作得到了常印佛院士、唐永成教授、汤加富教授和李建设教授的指导和帮助; 研究工作还得到了铜陵有色金属 (集团) 公司科技项目的支持; 在此一并表示衷心感谢!

References

- Burnham CW. 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes HL (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Wiley, 71–136
- Candela PA. 1991. Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments. *American Mineralogist*, 76: 1081–1091
- Candela PA. 1997. A review of shallow, ore-related granites: Textures, volatiles and ore metals. *Journal of Petrology*, 38: 1619–1633
- Chang YF, Liu XP and Wu CY. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1–379 (in Chinese)
- Chen JF, Xie Z, Zhang X and Zhou TX. 2001. Crustal evolution in Anhui: Nd and Sr isotopic evidence. *Geology of Anhui*, 11(2): 123–130 (in Chinese with English abstract)
- Chu GZ. 2003. Metallogenic system of Shizishan Cu-Au ore-field in Tongling area and its prospecting significances. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1–141 (in Chinese with English summary)
- Cloos M. 2001. Bubbling magma chambers, cupolas, and porphyry copper deposits. *International Geology Review*, 43: 285–311
- Ford JH. 1978. A chemical study of alteration at the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea. *Economic Geology*, 73(5): 703–720
- Fountain RJ. 1972. Geological relationships in the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville Island, New Guinea. *Economic Geology*, 67(8): 1049–1064
- Fu B, Ren QJ, Xing FM, Xu ZW, Hu WY and Zheng YF. 1997. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of copper-bearing porphyry in Shaxi, Anhui Province and its Geological Significance. *Geological Review*, 43(3): 310–316 (in Chinese with English abstract)
- Gammons CH and Williams-Jones AE. 1997. Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment. *Economic Geology*, 92(1): 45–49
- Garwin S. 2002. The geologic setting of intrusion-related hydrothermal systems near the Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa, Indonesia. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 9: 333–366
- Harris AC, Kamenetsky VS, White NC, Achterbergh EV and Ryan CG. 2003. Melt inclusions in veins: Linking magmas and porphyry Cu deposits. *Science*, 302(5653): 2109–2111
- Harris AC, Kamenetsky VS, White NC and Steele DA. 2004. Volatile phase separation in silicic magmas at Bajo de la Alumbrera porphyry Cu-Au deposit, NW Argentina. *Resource Geology*, 54: 341–356
- Harris AC, Golding SD and White NC. 2005. Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous fluids. *Economic Geology*, 100(5): 863–886
- Hou ZQ, Pan XF, Yang ZM and Qu XM. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits not related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings. *Geoscience*, 21(2): 332–351 (in Chinese with English abstract)

- Lanier G, John EC, Swensen AJ, Reid J, Bard CE, Caddey SW and Wilson JC. 1978. General geology of the Bingham mine, Bingham canyon, Utah. *Economic Geology*, 73(7): 1228 – 1241
- Li JW, Li XH, Pei RF, Mei YX, Wang YL, Qu WJ, Huang XB and Zang WX. 2007. Re-Os age of molybdenite from the southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 801 – 807 (in Chinese with English abstract)
- Lowell JD and Guilbert JM. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65: 373 – 408
- Lü QT, Hou ZY, Yang ZS and Shi DN. 2004. Underplating and the dynamical evolution model in the middle of the Lower Yangtze River: Constraints from geophysical data. *Science in China (Series D)*, 34(9): 783 – 794 (in Chinese)
- Mao JW, Xie GQ, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen YC. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294 – 314
- Meldrum SJ, Aquino RS, Gonzales RI, Burke RJ, Suyadi A, Irianto B and Clarke DS. 1994. The Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa Island, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1–3): 203 – 220
- Pan Y and Dong P. 1999. The Lower Changjiang(Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East China: Intrusion and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 15: 177 – 242
- Pan XF, Song YC, Wang SX, Li ZQ, Yang ZM and Hou ZY. 2009. Evolution of hydrothermal fluid of Dexing Tongchang copper-gold porphyry deposit. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1930 – 1950 (in Chinese with English abstract)
- Proffett JM. 2003. Geology of the Bajo de la alumbra porphyry copper-gold deposit, Argentina. *Economic Geology*, 98(8): 1535 – 1574
- Qiu JS, Ren QJ, Xu ZW and Zhang QZ. 1991. An investigation on geological-geochemical characteristics of altered rocks in Shaxi porphyry copper (Gold) deposit, Anhui Province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 27(2): 344 – 359 (in Chinese with English abstract)
- Redmond PB and Einaudi MT. 2010. The Bingham canyon porphyry Cu-Mo-Au Deposit. I. Sequence of intrusions, vein formation, and sulfide deposition. *Economic Geology*, 105(1): 43 – 68
- Ren QJ, Qiu JS, Xu ZW, Zhang QZ, Wang CQ and Yang RY. 1991. Formation conditions of the mineralized stock in the Shaxi porphyry copper (gold) deposit, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 10(3): 232 – 242 (in Chinese with English abstract)
- Richards JP. 2005. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits: In Porter TM (ed.) *Super-Porphyry Copper & Gold Deposit: A Global Perspective*. Adelaide: PGC Publishing, 7 – 25
- Shi DN, Lv QT, Xu WY, Yan JY, Zhou JH, Dong SW and Chang YF. 2012. Crustal structures beneath the Mid-Lower Yangtze metallogenic belt and its adjacent regions in eastern China: Evidences from P-wave receiver function imaging for a MASH metallization process? *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 389 – 399 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Ling MX, Yang XY, Fan WM, Ding X and Liang HY. 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview. *Science China (Earth Sciences)*, 53(4): 475 – 484
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the along Changjiang Area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 379 (in Chinese)
- Ulrich T and Heinrich CA. 2001. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbra, Argentina. *Econ. Geol.*, 96(8): 1719 – 1742
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119 – 144
- Whitney JA. 1975. Vapor generation in a quartz monzonite magma, a synthetic model with application to porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 70: 346 – 358
- Wu YC, Cao FY and Chang YF. 1999. A preliminary study on the deep-seated structural-magmatic control over the metallogenic system around the Yangtze River Reaches in Anhui Province. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 285 – 296 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Zhang ZS, Zhou WC, Qu WJ, Zhou CS and Wei SK. 2006. Metallogenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo-(W) deposits in southeastern Hubei Province: Constraints from Re-Os molybdenite ages. *Mineral Deposits*, 25(1): 43 – 52 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Jiang GH, Zhou SC and Hou KJ. 2008. Geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southeastern Hubei Province and constraints on the timing of lithospheric thinning, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1 – 13 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Zhao HJ, Zhou SC, Li XQ, Hou KJ and Pan HJ. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Tonglshan ore district in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance. *Mineral Deposits*, 28(3): 227 – 239 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM and Xu X. 1996. High-potassium calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui Province. *Geochimica*, 25(1): 29 – 38 (in Chinese with English abstract)
- Xu WY, Xu ZW, Gu LX, Ren QJ, Fu B and Niu CW. 1999. Heat evolution from intrusion to mineralization in Shaxi porphyry copper (gold) deposits, Anhui Province. *Geological Review*, 45(4): 361 – 366 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZW, Xu WY, Qiu JS, Fu B and Niu CW. 2000. An investigation of the age and geological-geochemical characteristics of quartz diorite porphyry in Shaxi porphyry copper (Gold) deposit. *Geology and Prospecting*, 36(4): 36 – 40 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and geological significance on the Cu-bearing porphyry of Shaxi from southern Tan-Lu Fault Belt. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(2): 52 – 56 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZM, Hou ZQ, Song YC, Li ZQ, Xia DX and Pan FC. 2008. Genesis of giant porphyry Cu deposit at Qulong, Tibet: Constraints from fluid inclusions and H-O isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 27(3): 279 – 318 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Liu J, Fan F, Cooke DR and Jowitt SM. 2011. Petrogenesis of volcanic and intrusive rocks of the Zhuanqiao stage, Luzong Basin, Yangtze metallogenic belt, East China: Implications for ore deposition. *International Geology Reviews*, 53(5–6): 526 – 541
- Zhang ZY, Du YS, Zhang J, Peng ZS, Li DP and Jia PF. 2010. Alteration and mineralization zoning in Tongshan skarn-type copper deposit in Guichi, Anhui Province, and its genesis. *Mineral Deposits*, 29(6): 999 – 1016 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Yue SC and Yuan F. 2005. Lithogenesis of Diorites and Copper, Gold Mineralization in Yueshan Orefield, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 148 (in Chinese)
- Zhou TF, Yuan F, Yue SC, Liu XD, Zhang X and Fan Y. 2007. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn-and vein-type deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31(2): 279 – 303
- Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665 – 1678 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Zhang LJ, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*,

85(5): 712–730 (in Chinese with English abstract)
 Zhu X, Huang CK, Rui ZY, Zhou YH and Zhu XJ. 1983. The Geology of Dexing Porphyry Copper Ore Field. Beijing: Geological Publishing House, 1–336 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1–379
- 陈江峰, 谢智, 张翼, 周泰禧. 2001. 安徽的地壳演化: Sr-Nd 同位素证据. 安徽地质, 11(2): 123–130
- 储国正. 2003. 铜陵狮子山铜金矿田成矿系统及其找矿意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–141
- 傅斌, 任启江, 邢凤鸣, 徐兆文, 胡文瑄, 郑永飞. 1997. 安徽沙溪含铜斑岩⁴⁰Ar-³⁹Ar定年及其地质意义. 地质论评, 43(3): 310–316
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332–351
- 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 臧文栓. 2007. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质学报, 81(6): 801–807
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束. 中国科学(D辑), 34(9): 783–794
- 潘小菲, 宋玉财, 王淑贤, 李振清, 杨志明, 侯增谦. 2009. 德兴铜厂斑岩型铜金矿床热液演化过程. 地质学报, 83(12): 1930–1950
- 邱检生, 任启江, 徐兆文, 张重泽. 1991. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床蚀变岩地质地球化学特征研究. 南京大学学报, 27(2): 344–359
- 任启江, 邱检生, 徐兆文, 张重泽, 方长泉, 杨荣勇. 1991. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床矿化小岩体的形成条件. 矿床地质, 10(3): 232–242
- 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 严加永, 赵金花, 董树文, 常印佛. 2012. 长江中下游成矿带及邻区地壳结构——MASH 成矿过程的 P 波接收函数成像证据? 地质学报, 86(3): 389–399
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1–349
- 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 1999. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造岩浆控制. 地学前缘, 6(2): 285–296
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 张祖送, 赵维超, 屈文俊, 赵财胜, 魏世昆. 2006. 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W) 矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄. 矿床地质, 25(1): 43–52
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 侯可军. 2008. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约. 岩石学报, 24(8): 1–13
- 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 2009. 鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 28(3): 227–239
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩. 地球化学, 25(1): 29–38
- 徐文艺, 徐兆文, 顾连兴, 任启江, 傅斌, 牛翠祎. 1999. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床成岩成矿热历史探讨. 地质评论, 45(4): 361–366
- 徐兆文, 徐文艺, 邱检生, 傅斌, 牛翠祎. 2000. 与沙溪斑岩铜(金)矿床有关的石英闪长斑岩地质地球化学特征及形成时代研究. 地质与勘探, 36(4): 36–40
- 杨晓勇. 2006. 庐断裂带南段沙溪含铜斑岩体的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究及意义. 矿物岩石, 26(2): 52–56
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代详, 潘凤雏. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿. 矿床地质, 27(3): 279–318
- 张智宇, 杜杨松, 张静, 庞振山, 李大鹏, 贾鹏飞. 2010. 安徽贵池铜山矽卡岩型铜矿床蚀变矿化分带特征及其成因. 矿床地质, 29(6): 999–1016
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰. 2005. 安徽月山矿田成岩成矿作用. 北京: 地质出版社, 1–148
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665–1678
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报, 85(5): 712–730
- 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 周耀华, 朱贤甲. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社, 1–336