

Doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2012.10.024

安徽沙溪式斑岩铜(金) 矿床地质地球化学特征及成因分析

姚孝德¹, 陈芳^{1,2}, 王利民¹, 孙明明¹

(1. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要:沙溪斑岩铜(金)矿床位于庐枞火山岩盆地西北外围,处于郯庐断裂带内部。矿体主要产于燕山期的石英闪长斑岩,次为黑云母石英闪长斑岩中。主要成矿期为岩浆期后热液期。蚀变分带自内向外:钠-更长石化带—硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化带—钾硅酸盐青磐岩化叠加带—石英绢云母化带—青磐岩化带,主要工业矿体位于钾硅酸盐化带及其外侧。文章总结沙溪式斑岩铜(金)矿床地质地球化学特征,并对该类型铜(金)矿床的成因进行了探讨。

关键词:沙溪式斑岩铜(金)矿;地质地球化学特征;蚀变分带;矿床成因;庐江沙溪

中图分类号:P612

文献标识码:A

文章编号:1003-5060(2012)10-1397-09

On geological and geochemical features and cause of formation of porphyry copper gold deposit of Shaxi type in Lujiang County, Anhui

YAO Xiao-de¹, CHEN Fang^{1,2}, WANG Li-min¹, SUN Ming-ming¹

(1. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The porphyry copper gold deposit of Shaxi type locates in northwest periphery of Luzong volcanic basin, inside of the Tanlu fault zone. The ore bodies mainly occur in quartz diorite of Yanshanian, and then in biotite quartzdiorite porphyry. The main metallogenic period is the postmagmatic hydrothermal solution. The alteration zones from the inner to outward are successively the Na-oligoclase zone, the anhydrite, biotite and K-silicate zone, the superimposed zone of K-silicate and propylite, the quartz-sericite zone, and the propylitic zone. The mainly industry ore bodies locate in the K-silicate zone and its outside. The geological and geochemical features of the porphyry copper gold deposit of Shaxi type are summarized, and the cause of the formation of the deposit of this type is discussed.

Key words: porphyry copper gold deposit of Shaxi type; geological and geochemical feature; alteration zoning; cause of formation of deposit; Shaxi in Lujiang County

0 引 言

庐江县沙溪地区位于长江中下游铜铁金成矿带的中段,大别山隆起北部金寨—舒城火山岩带

的东南缘,庐江—枞阳中生代火山岩盆地的西北缘,处于郯庐断裂带内部^[1],是安徽省斑岩型铜矿的主要地区,该地区累计查明的铜资源储量占安徽省累计查明铜资源储量的 9.31%。沙溪斑岩

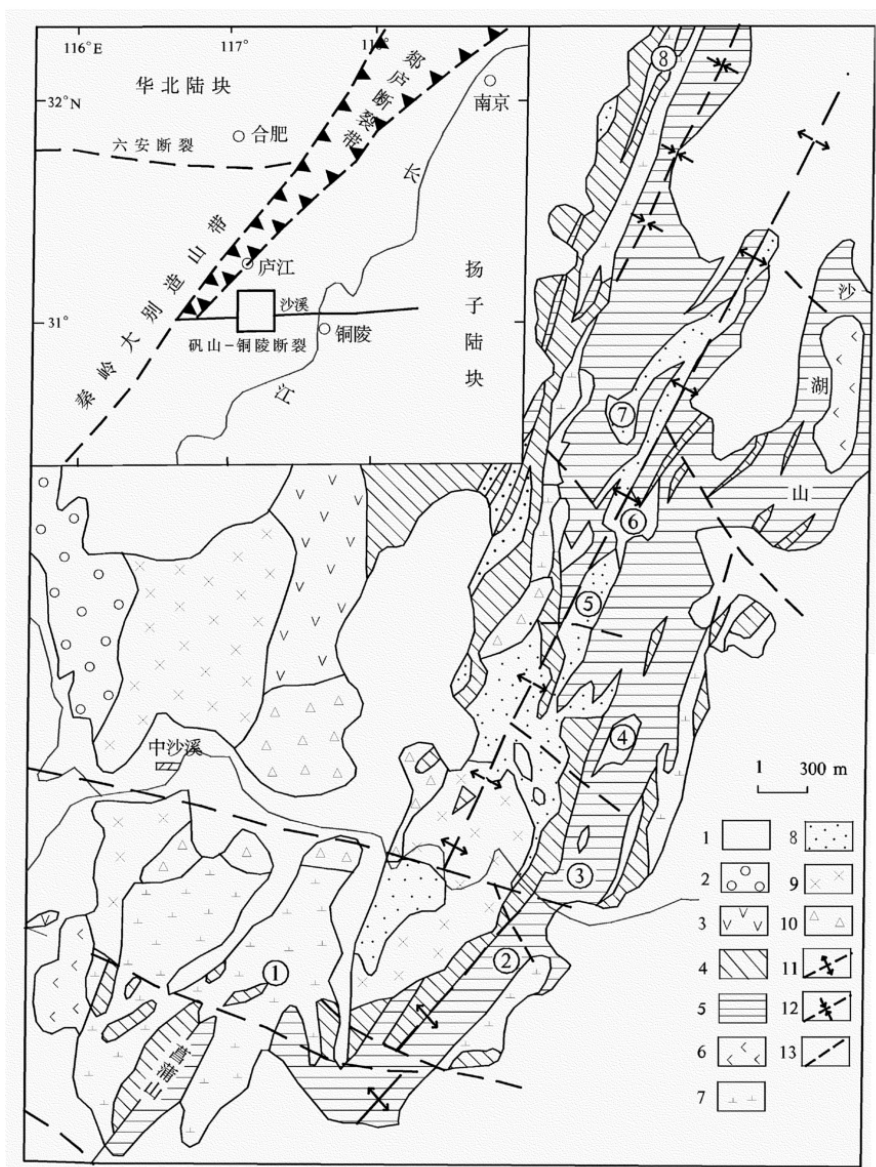
收稿日期:2012-03-08;修回日期:2012-05-29

基金项目:国土资源部地质大调查资助项目(1212010881616)

作者简介:姚孝德(1964—),男,安徽望江人,安徽省地质调查院高级工程师。

型铜(金)矿主要由燕山早期 SiO_2 过饱和或微过饱和和碱钙-钙碱系列石英闪长斑岩、黑云母石英闪长斑岩等中酸性斑岩侵入体(具复式岩体特征)控制,侵入岩体在时间上和空间上对矿床(点)的分

布直接进行了定位,同时对矿液起阻挡作用的志留系砂页岩对成矿也极为有利。沙溪铜(金)矿床自南西至北东分布的矿段(点)有 8 处,如图 1 所示^[2-4]。



1. 第四系沉积物 2. 中-新生代红层 3. 中生代火山岩 4. 中生代碎屑岩 5. 古生代碎屑岩 6. 闪长岩类 7. 浅成相闪长斑岩
8. 含石英闪长斑岩-黑云母石英闪长斑岩 9. 浅火山岩 10. 侵入角砾岩 11. 推测背斜轴 12. 次级向斜轴 13. 断层线
矿段或矿点: ① 菖蒲山 ② 龙头山 ③ 断龙颈 ④ 鼓架山 ⑤ 铜泉山 ⑥ 凤台山 ⑦ 棋盘山 ⑧ 八字口

图 1 安徽沙溪铜(金)矿床构造-岩浆控矿地质略图

1 区域成矿背景

沙溪斑岩型铜(金)矿床位于长江中下游燕山期 CuFeAuAgPbZnCa 黄铁矿明矾石成矿带, 庐枞火山岩盆地的北缘, 滁县—庐江构造岩浆岩带西南部的庐江县沙溪地区, 处于下扬子拗陷带, 庐枞火山-沉积盆地边缘隆起带, 郟庐断裂带南东

侧、长江深断裂北西侧, 燕山期北东向褶皱、断裂带与近东西向构造带的复合部位, 矿区位于巢湖—潜山断陷盆地内的次级隆起, 盛桥—菖蒲山北东向复背斜的南西端。

据文献^[5-14]研究, 庐枞陆相火山岩系形成于晚侏罗世—早白垩世, 构成庐枞火山岩盆地的主体; 庐枞火山岩盆地是一个以中侏罗统象山群

陆相碎屑岩建造为基底,经燕山期早期运动而发育起来的继承性火山岩盆地。喷发-喷溢物的最大厚度达 2 104.07 m。伴随着火山岩浆活动,形成了一系列与火山-次火山有关的矿床,这些矿床包括铁、硫、铜、铅、锌、银、明矾石及硬石膏等矿种。这些矿床在时间上主要集中在火山-岩浆活动早期演化阶段的龙门院旋回和砖桥旋回,在空间上主要沿盆地边缘、火山机构和断裂构造分布。

紧邻庐枞火山岩盆地的沙溪地区,其成矿母岩主要为燕山早期的中酸性侵入岩,岩性主要为石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩。对矿液起阻挡屏蔽作用的主要为志留系砂页岩。

2 矿床地质概况

2.1 地层

矿区出露地层主要有:志留系下统高家边组(S_{1g})以页岩、粉砂质泥岩为主的浅海相碎屑岩;志留系下统坟头组(S_{1f})以砂岩、粉砂岩、石英砂岩和泥质粉砂岩为主的海相碎屑岩和粉砂质泥岩;泥盆系上统五通群(D_{3w})以石英岩、石英砂岩为主的碎屑岩及黏土质页岩;侏罗系中下统象山群(钟山组 J_{1z} 、罗岭组 J_{2l})以石英砂岩、(泥质)粉砂岩为主的陆相-河湖相碎屑岩;侏罗系上统火山岩组(红花桥组)以(凝灰质)安山岩、(安山质)凝灰岩为主的陆相火山岩及少量凝灰质粉砂岩;白垩系下统杨湾组(K_{1y})以砾岩、砂岩为主的红色砂砾岩;第四系(Q)砂砾及黏土。

2.2 构造

矿区所在构造位置,为一北东向块断隆起,由下、中志留统砂页岩组成,两侧被下、中侏罗统石英砂岩、砂页岩和泥质粉砂岩覆盖。区内构造运动强烈,构造线方位主要包括近东西向、近南北向及北北东向 3 组,发育有明显的构造角砾岩带、挤压破碎带、侵入-接触破碎带及侵入-构造破碎带。其中近东西向构造以印支期断裂为主,未见褶皱构造;北东向构造由印支期盛桥-菖蒲山北东向复背斜及与之伴生的北东向压性及压扭性走向断裂、北西向或近东西向横张断裂组成;北北东向断裂主要表现为燕山期压扭性断裂。不同方向的构造复合部位,控制了区内岩浆的侵入活动。

2.3 岩浆岩

本区岩浆岩,为一套碱钙-钙碱系列同源不同阶段的中酸性杂岩体。在下白垩统红层中有明显的火山岩和闪长斑岩类砾石,并不整合超覆于中下侏罗统地层之上,岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄

为 (127.9 ± 1.6) Ma,含矿岩体(包括石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩) Ar-Ar 法年龄为 123.6 Ma;不含矿岩体 Ar-Ar 法年龄为 126.8 Ma,岩浆活动时间相当于晚侏罗-早白垩世,属燕山早期。矿区主要含矿岩体为石英闪长斑岩、其次为黑云母石英闪长斑岩。

喷出岩主要分布于矿区西北部,其他地段亦见零星出露。侵入体主体分布在沙溪河以南,向北沿北东和北北东向构造带呈枝叉状撒开,侵入体与围岩接触带形态复杂,呈岩株、岩枝、岩墙、岩瘤状、岩漏斗状产出,包括中深成-浅成-超浅成等不同地质环境的产物;侵位于浅成环境中的岩体,压力的突变导致成矿流体的减压沸腾,为成矿流体的不混溶分离,进而产生强烈矿化富集创造了有利条件。

3 矿床地质特征

3.1 矿床组合分布、矿体及矿化分带特征

3.1.1 矿床组合及分布

沙溪铜(金)矿床自南东至北西由菖蒲山、龙头山、断垄颈、鼓架山、铜泉山、凤台山、棋盘山、八字口等矿段(点)组成,整体呈北东向展布。此外矿床内尚有打银山铅锌矿点、福泉山黄铁矿矿点等。

矿床内的各矿段(点)均产于八家口-铜泉山北北东向断裂带附近,矿带斜越北东向盛桥-菖蒲山复背斜断续存在。铜泉山以北各矿段(点)均产在复背斜的北西翼,其南的矿段(点)则赋存在南东翼。矿体绝大部分产在北北东向断裂带的下盘即南东盘。对不同矿段(点)而言,其产出条件不完全相同,如铜泉山矿段位于北北东向断裂与北东向复背斜的斜接复合部位;断龙颈矿段为 2 条并列的北北东向断裂即八家口-铜泉山、沙湖山-鼓架山断裂挟持地段,其南有近东西向断裂通过;凤台山矿段主要产于北东向和次级北北西向构造交汇部位。

3.1.2 矿体空间分布特征

工业铜矿体绝大部分产于岩体内,主要容矿岩石为石英闪长斑岩、黑云母石英闪长斑岩,少量为角闪闪长斑岩、侵入角砾岩(铜泉山)、闪长斑岩。少部分矿体产于有关岩体近旁的砂页岩或捕掳体中,其中以志留系中居多,其次为侏罗系地层。

矿体成群出现,分布较零散,矿体沿纵向延展远远大于横向,呈明显拉长带状,矿体大小相差悬殊,其中以铜泉山 I、II、III 号矿体,断龙颈 25、26、31 号矿体和凤台山 25 号矿体规模较大。沙

溪矿床铜矿体产出特征大体有以下几种^[15-16]：

(1) 脉状铜矿体,产于中、下侏罗统石英砂岩和泥质粉砂岩的北北东—南北向裂隙或层间裂隙中,为含黄铜矿的黄铁矿-石英脉,Cu 品位较低,伴生 Au 少于 1×10^{-6} 。

(2) 细脉浸染带或细脉浸染—含铜石英脉(带)矿体,主要产于石英闪长斑岩及黑云母石英闪长斑岩体上部蚀变带中,受北北东向裂隙带控制,规模较小,含铜较高。铜泉山石英闪长斑岩中,Cu 多于 1%,伴生 Au 为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$ 。

(3) 细脉浸染“钟状”矿体,产于斑岩体中呈同心环(带)状的矿化蚀变带中心部位,埋藏较深,为沙溪产于石英闪长斑岩体中的矿体,该类型矿体为沙溪斑岩矿床的主矿体。细脉浸染状铜矿化主要分布在钾硅酸盐化带及其外侧的钾硅酸盐化—青磐岩化叠加带内,与硬石膏(化)密切共生。含 Cu 0.44%~0.68%,伴生金 0.5×10^{-6} (最高 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$)。

(4) 矿体的产出特征除上述 3 种主要类型外,还有受不同方向裂隙交织地段控制的小型脉状—网脉状铜矿体和分布在铜矿化带之上围岩中的含金黄铁矿-石英脉。

铜泉山矿段圈定矿体 77 个,主矿体赋存标高为 -659~-2 m,矿体长 300~1 100 m,假厚度 4.40~197.65 m,沿倾斜方向延伸 70~680 m;断龙颈矿段共有矿体 42 个,主矿体赋存标高为 -45~-554 m,矿体长 600~800 m,假厚度 3.97~105.93 m,沿倾斜延伸 37~388 m;凤台山矿段已圈定矿体 63 个,主矿体赋存标高 -222~-823 m,矿体长约 300 m,假厚度 60.72~227.30 m,沿倾斜延伸 327~626 m;龙头山矿段,圈定矿体 16 个,矿体较小品位不高。

3.1.3 矿化分带特征

沙溪斑岩铜(金)矿床具有良好的矿化分带,从矿化中心向外依次为:磁铁矿、辉钼矿(少)-黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿-黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、黄铁矿、自然金-黄铜矿、黄铁矿-黄铁矿、方铅矿、闪锌矿;矿石中亦有较明显的矿石构造分带,即从矿化中心至边缘,由浸染状—细脉状—脉状。主要工业矿体位于钾硅酸盐化带及其外侧。

矿区氧化作用不发育,氧化带下限深度 0.91~52.95 m 不等,氧化矿物较少,局部地段淋滤作用强烈,铜元素大量流失。零星见有次生富集现象,表现为次生辉铜矿沿砂页岩的节理、裂隙充填呈薄膜或细脉,少见浸染状辉铜矿;斑岩体因

风化作用岩性松软,其中有黏土矿物,铜元素呈离子吸附状态,难以形成独立矿物。

3.2 矿石特征

3.2.1 矿石类型及矿物组合

矿石类型:自然类型为含铜斑岩型、含铜砂页岩型、含铜角砾岩型;工业类型主要为硫化矿石,少量氧化矿石、混合矿石。

矿物组合:主要金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、假象赤铁矿、褐铁矿;其次为斑铜矿、辉铜矿、磁铁矿、辉钼矿、赤铁矿、菱铁矿,黄钾铁钒、沥青铜矿;少量铜蓝、蓝辉铜矿,磁黄铁矿、银金矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、镜铁矿、钛铁矿、金红石、绿松石、孔雀石、蓝铜矿、软锰矿等。

脉石矿物主要有斜长石、石英、绢云母、碳酸盐、钾长石、黑云母、绿泥石、硬石膏,其次为绿帘石、磷灰石、重晶石、锆石、榍石、褐帘石、高岭土,少量电气石、透辉石、萤石、黄玉等。

铜泉山矿段矿石的主要矿物组合为:硬石膏-黄铜矿-石英、黄铜矿-斑铜矿-石英、黄铁矿-黄铜矿-石英、辉钼矿-黄铜矿-石英、黄铜矿-磁铁矿-石英。

3.2.2 矿石结构构造

矿石结构主要有自形—半自形晶结构、他形晶结构、固溶体分离结构、压碎斑状结构、交代残余结构等;其余为包含结构、叶片状—鳞片状结构等。矿石构造以细脉浸染状构造为主,浸染状和细脉状构造次之。

3.3 围岩蚀变

3.3.1 蚀变类型及主要蚀变矿物特征

矿床主要的蚀变类型有:钾长石化、黑云母化、硬石膏化、硅化、白云母化、绢云母-水云母-伊利石化、绿泥石化、绿帘石化、钠长石化、碳酸盐化,此外还可见少量的阳起石化、石膏化、高岭石化、磷灰石化、沸石化等。

区内钾长石的形成大致可划分为 2 个世代,早期钾长石是岩浆晚期自变质阶段形成的,钾长石呈镶嵌状、云雾状交代斜长石,岩浆期后热液阶段形成的钾长石多与石英、硬石膏等一起组成脉状体,本区钾长石化总体不很发育,分布也不均匀。硬石膏是本区有别于其他斑岩型铜矿的特征性蚀变矿物,主要分布在矿床深部的钾硅酸盐化带中,其主要产状为呈单一的硬石膏细脉或与石英、钾长石、碳酸盐等组成复脉,此外还可见硬石膏交代斜长石斑晶及钾长石变斑晶,呈多种形式与其他蚀变矿物组合。绢云母多以鳞片状集合体交代斜长石斑晶出现,其化学成分具富镁特征,

$w(\text{MgO})$ 均在 2% 以上,深色矿物蚀变形成的绢云母与长石类矿物蚀变形成的绢云母具不同的特征,前者贫硅富铁镁,后者则相对富硅贫铁镁,另外,其与中国其他斑岩铜矿绢云母的化学成分相比, $w(\text{K}_2\text{O})$ 偏低,沙溪地区绢云母 $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 7.5%~9.0%,中国其他斑岩铜矿绢云母 $w(\text{K}_2\text{O})$ 多在 10% 以上^[17-20]。绿泥石分布范围广,延续时间长,几乎贯通于各个蚀变带,其交代的主要产状有:交代暗色矿物的绿泥石颜色较深,折光率相对为高;交代长石类矿物的绿泥石颜色较淡,常呈面状分布,折光率相对为低;脉状绿泥石,本区绿泥石均属镁铁绿泥石($f=25\%\sim 75\%$),从深部到浅部,绿泥石 SiO_2 、 CaO 含量逐渐升高,而 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 含量逐渐降低。钠长石本区含量虽然不多,但分布广泛,在早期蚀变阶段,钠长石主要呈粒状或不规则集合体交代原岩,并见钠长石呈微细脉交代斜长石,在晚期蚀变阶段则可见钠长石与绿泥石、绿帘石、硫化物共生。

3.3.2 蚀变岩石类型

本区蚀变岩石自内向外可归结为 5 大类:

(1) 钠-更长石蚀变岩。在斑岩铜矿最深部位常发育有钠-钙交代蚀变带,表现为钾长石常被钠-更长石交代,而原生黑云母常为阳起石交代。

(2) 硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化蚀变岩。由原岩经钾交代形成,其标型矿物为硬石膏、黑云母

和钾长石,常叠加后期蚀变。

(3) 钾硅酸盐-青磐岩化叠加蚀变岩。此类蚀变岩钾长石和硬石膏含量大大减少,而青磐岩化矿物组合则甚为发育,与浅部青磐岩化蚀变岩的区别在于存有少量的钾长石和硬石膏。

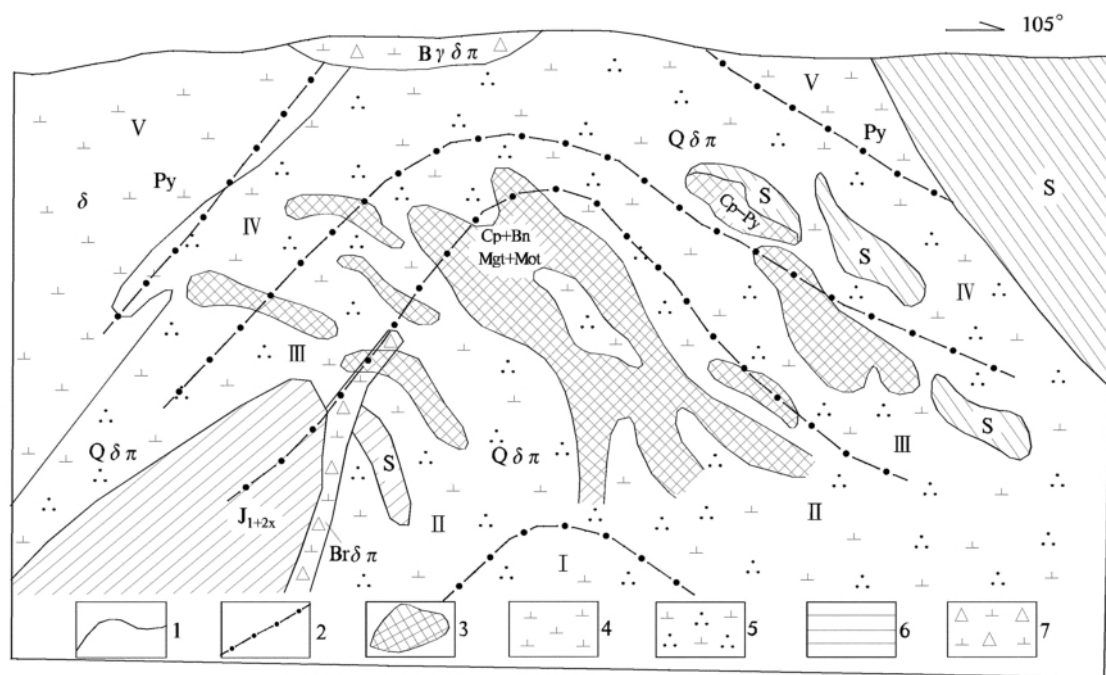
(4) 石英绢云母化蚀变岩。主要蚀变矿物组合为石英+绢云母+白云母+水云母+伊利石+碳酸盐。

(5) 青磐岩化蚀变岩。特征性蚀变矿物组合为绿泥石+绿帘石+碳酸盐+钠长石+黄铁矿。

其中,硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化蚀变岩,以 $w(\text{K}_2\text{O})$ 较高为特征;钾硅酸盐-青磐岩化叠加蚀变岩, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 较高,平均为 5.08%,离差相对微小;石英绢云母化蚀变岩,以 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 偏高为特征, $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 最低;青磐岩化蚀变岩,具高钠低钾特点, $w(\text{MnO})$ 在本蚀变岩中较高,说明锰有趋向于浅部蚀变带富集的趋势。矿区蚀变岩主要岩石化学组分在热液蚀变体系中的变化趋势,见文献[3]。

3.3.3 蚀变分带

上述蚀变岩石在空间上的分布格局即构成蚀变分带,由内向外蚀变分带为:钠-更长石化带 I,硬石膏-黑云母-钾硅酸盐化带 II,钾硅酸盐-青磐岩化叠加带 III,石英-绢云母化带 IV,青磐岩化带 V,如图 2 所示。



1. 地质体界线 2. 蚀变带界线 3. 矿体 4. 闪长岩(δ) 5. 石英闪长斑岩($\text{Q}\delta\pi$) 6. 砂页岩 7. 侵入角砾岩($\text{B}_{\text{r}\delta\pi}$)

S—志留系 J_{1+2x} —侏罗系中、下统 Cp—黄铜矿 Py—黄铁矿 Mt—磁铁矿 Bn—斑铜矿 Mot—辉钼矿

图 2 安徽沙溪式斑岩型铜(金)矿床蚀变分带模式图

区内蚀变作用广泛发育,主要为热液蚀变作用,具有微弱岩体自变质作用和热力变质作用。热液蚀变带总体走向北东—北北东向,具线型蚀变特征,展布受矿区构造控制。蚀变强度以北北东向主断裂为中心,向两侧渐弱且具不对称分布特点。区内仅含矿岩体石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩有较清晰蚀变分带,两岩体蚀变特征基本一致,但后者蚀变规模较小,强度较弱。

沙溪铜(金)矿床蚀变分带模式与藏东玉龙斑岩铜矿^[21]、云南普朗斑岩铜矿^[22]、新疆准噶尔斑岩铜矿^[23]等相比,具有如下特征:

(1) 不存在泥化带。

(2) 石英绢云母化和钾长石化总体较弱。

(3) 钠-更长石化强。

(4) 青磐岩化强,分布范围广,在钾硅酸盐化带外围发育钾硅酸盐-青磐岩化叠加带。

(5) 矿化主要集中在钾硅酸盐化带中而不在石英-绢云母化带。

(6) 辉钼矿少见,Mo/Cu 极低,伴生有一定的金矿化。

上述特征反映出本区蚀变分带模式接近于闪长岩蚀变分带模式,但又有自身的特点^[3]。

3.4 矿化阶段及分布

本矿床的成矿过程可划分为岩浆期、热液期、表生期等 3 个成矿期,其中热液期可细分为 2 个成矿阶段,即石英-硫化物阶段、碳酸盐-黄铁矿阶段。

3.4.1 岩浆期

由于温度较高(350℃以上)的热流体具有较强的渗透扩散能力,发生广泛的蚀变作用;主要表现为发育了较明显的钾长石化以及黑云母化和石英钾长石化作用,所形成的蚀变岩石分布在同心环(带)状蚀变带的核部或中心,同时形成了磁铁矿及极少量的金属硫化物。

3.4.2 热液期

热液期是该矿床的主要成矿时期。分为如下 2 个阶段:

(1) 石英-硫化物阶段。早期形成少量磁铁矿和较多硫化物,硫化物以黄铁矿为主,另有微量辉钼矿。大量含铜矿物(黄铜矿、斑铜矿)沉淀于 350~150℃ 的温度范围内,其形成晚于磁铁矿、辉钼矿,最早生成的黄铜矿与硬石膏共生,是本矿床铜矿化的重要特点之一。伴生的金主要以自然金的形式呈显微、次显微状赋存于黄铜矿、黄铁矿和斑铜矿中,其形成与铜矿化同期或偏晚,金含量

与铜呈强烈正相关关系。脉石矿物以绢云母、石英、细脉钾长石为主。

(2) 碳酸盐-黄铁矿阶段。主要形成矿物有碳酸盐、石英、绿泥石、绢云母(水云母)、高岭土;金属硫化物较少,以黄铁矿为主,成矿温度约 200~150℃,铜矿化微弱。

3.4.3 表生期

矿区内局部因发生氧化淋滤作用,见有次生富集现象。

本矿床的主要成矿阶段在岩浆晚期和热液期。金属硫化物在岩浆晚期开始分异沉淀,到热液期石英-硫化物阶段大量聚集。

4 成矿条件及矿床成因探讨

4.1 成矿物理化学条件

4.1.1 岩石化学特征

(1) 岩浆岩的岩石化学特点具有如下规律:

① 本区岩浆岩绝大部分为正常系列,少数为铝过饱和系列、过碱性或弱碱性岩石,SiO₂ 过饱和或微过饱和岩石,其中主要含矿岩体石英闪长斑岩 SiO₂ 含量及 Q 值较戴里同类岩石明显偏低,是国内大中型斑岩型铜矿床容矿岩体偏中性的典型代表;② 大部分岩体碱质含量偏高,主要及次要含矿岩体石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩中 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 分别为 6.90% 和 6.59%,均属钙碱系列,较戴里同类岩石分别高 1.43% 和 1.12%, a 值分别高 3.89 和 2.95, n 值分别高 11.83 和 5.74;本区岩体 Na₂O 大于 K₂O, n 值一般 70 左右,最高达 89.6,含矿石英闪长斑岩 n 值平均为 80.63,Na₂O+K₂O 亦明显偏高;③ 石英闪长斑岩、黑云母石英闪长斑岩具有良好的含矿性;富碱、低硅反映了岩浆具较低的黏度、液相线温度和较高的 H⁺、碱离子活度,从而有利于含铜成矿流体从岩浆中分离出来。

(2) 地层含矿性。矿区地层中 Cu 的含量变化范围较大,侏罗系及志留系坟头组中 Cu 含量明显偏低,且低于维氏值(57×10^{-6}),而志留系高家边组 Cu 含量则高于维氏值;由此可见,高家边组对成矿是有利的,可能为铜矿化富集提供部分成矿物质。然而,近矿围岩中,侏罗系和高家边组的铜含量基本上与背景值一致,但坟头组却比背景值低,仅为 9×10^{-6} 。按坟头组蚀变范围计算则有近 2×10^{-4} t 铜被带出,与矿床所拥有的铜储量相比,微不足道;可见地层中的铜对成矿的贡献是微小的。

4.1.2 同位素特征

(1) 硫同位素特征。金属硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.278\% \sim +0.380\%$, 算术平均值为 $+0.162\%$, $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 变化范围为 $22.14 \sim 22.28$, 平均 22.183 , 接近陨石硫, 说明本区成岩成矿物质来源于上地幔或者地壳深部。硬石膏中 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $+0.948\% \sim +1.073\%$, $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ $21.984 \sim 22.011$, 表明成矿过程中有岩石圈硫源的参与。

(2) 氧同位素特征。矿石中石英的氧同位素组成平均为 1.005% ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$), 经计算达到平衡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $0.351\% \sim 0.552\%$, 与岩浆水接近。

4.1.3 成矿流体

燕山期来源于上地幔或地壳深部分异出的中—中酸性岩浆是成矿物质的主要来源, 成矿流体以岩浆期后热液为主, 混入少量地下水, 为含钾和二氧化硅较高的流体。

4.1.4 成矿物理化学条件

根据部分矿物的测温结果得岩浆晚期至石英硫化物阶段的成矿温度为 $190 \sim 355\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属中温偏高。石英、黄铜矿、黄铁矿各矿物爆裂温度分别为 $190 \sim 355\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $265\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

就整个矿床而言, 显示出从高温(磁铁矿-黄铜矿、斑铜矿组合)至中低温(铜、铅、锌、重晶石脉, 含铜黄铁矿-碳酸盐脉)的成矿特点; 根据不同矿物组合的空间分布, 可以看出随深度增加, 成矿温度有增高的趋势。沙溪矿床主要成矿温度接近或稍高于我国典型斑岩铜矿床的温度。据南京大学地球科学系内生金属矿床成矿作用重点实验室的研究可知, 沙溪铜(金)矿床早期成矿阶段的温度变化范围在 $440 \sim 529\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 峰值 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度以 $\text{NaCl}_{\text{equiv}}$ 的质量分数计, 为 $52\% \sim 58\%$; 主成矿阶段温度范围 $280 \sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$, 峰值 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度集中分布在 2 个区域, 分别为 $41\% \sim 52\%$ 和 $9\% \sim 17\%$; 晚期成矿阶段为 $110 \sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 峰值 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $8\% \sim 24\%$ 。

4.2 矿床成因探讨

沙溪斑岩铜(金)矿床矿体的形成与斑岩体有密切的关系, 矿化作用与岩浆活动在时间上和空间上具成因联系, 有 82% 以上的工业矿体产于斑岩体中(含矿岩体主要为石英闪长斑岩、其次为黑云母石英闪长斑岩), 其余矿体多数产于岩体与砂页岩的接触带附近或岩体内围岩捕掳体中。含矿岩体规模巨大, 岩体顶盖以志留系高家边组及坟头组为主, 其次为侏罗纪早中世紫红色碎屑岩系。

上述岩石化学特征及同位素特征表明, 成矿

热液及成矿物质主要来源于上地幔或者地壳深部的岩浆体系, 而该区的闪长岩从其产生到演化的特征上来看, 都是有利于大型乃至超大型斑岩矿床的形成^[2]。

研究标明, 沙溪斑岩型铜(金)矿床内部的成矿流体内压力聚集至大于 100 MPa 时, 引起斑岩体顶部爆破^[24], 沙溪矿区浅部广泛分布的隐爆角砾岩就是如此。斑岩体的爆破作用产生大量构造裂隙, 从而导致体系开放, 使成矿流体发生多次减压沸腾, 进而导致矿质的沉淀^[2]。期间形成大量气泡包裹体和多相包裹体, 当然, 也有相当部分包裹体是在体系相对封闭条件下形成的。沙溪斑岩铜(金)矿的形成深度不超过 2 km ^[24]。

沙溪铜(金)矿床成矿流体在演化过程中发生的流体不混溶分离作用, 使含矿岩体中原本均一的成矿流体, 不混溶地分离为富气相的低盐度流体(气相)和富液相的高盐度成矿流体。由于在高盐度流体中金属元素溶解度增高, 大大增加了流体中成矿元素的含量, 这种流体的密度较大, 易于集中在矿化带中心或深部, 而富气相的流体则易于分散到矿化带上部或外围, 从而导致沙溪矿床矿化富集中心集中在深部, 而其上部 and 外围则鲜有矿体形成。

大量同位素年龄数据表明, 形成该斑岩铜(金)矿的沙溪石英闪长斑岩侵入的年龄多分布在 $100 \sim 150\text{ Ma}$ 之间^[24], 即沙溪矿床的形成年龄是在白垩纪末期。而这个时期的郯庐断裂带主要受到来自华北板块与印度板块较强的活动影响而处于性质转化时期, 即从晚侏罗世之前的左行平移为主而转变成晚侏罗世之后—早白垩世早期的压扭—引张的性质, 早白垩世晚期至第三纪以来引张的特点, 从而有利于全区岩浆的上升入侵及沙溪斑岩铜(金)矿的形成。这与我国燕山期对斑岩铜矿具有特殊的重要意义相一致, 也与世界大型斑岩铜矿床形成的时代相一致。

矿区位于秦岭纬向构造带南支东延部分北淮阳“山”字型构造前弧东翼与新华夏构造体系的复合部位; 介于北淮阳安山-流纹粗面岩火山岩带和庐枞安山-粗面岩火山岩盆地之间, 前者伴随 NWW 向构造的产生而产生, 后者受 NE 向断陷盆地控制。矿区西北部福泉山及东部、南部沿下拐一带火山岩可能属于郯庐断裂火山岩带的组成部分。这些陆相火山岩建造均形成于晚侏罗—早白垩世, 与区域广泛的燕山期侵入活动有密切的亲缘关系。

沙溪斑岩铜(金)矿形成受到郯庐断裂活动的控制,全矿区的次级控矿构造与郯庐断裂有关。成矿的同生构造如矿区主要的容矿构造——NNE 向的复式背斜及导矿构造、断裂都与郯庐断裂活动有关。郯庐断裂的主干断裂在矿区西部通过。矿区东部濒临庐枞火山岩盆地,该盆地位于莫霍面陡倾变化面的斜坡地带,其西侧莫霍面深度约 35~40 km,东侧长江深断裂一线约 30 km。沙溪斑岩铜(金)矿区位于 2 个环形构造的交接部位^[2];大环形构造即为庐枞火山岩盆地,同时又是该矿区周围火山岩组成的小环形构造的交接部位,这是国内外乃至超大型斑岩型铜矿形成的另一有利条件。

总之,本区的成矿时间为燕山早期,成矿物质来源于上地幔或者地壳深部,成矿作用是在斑岩上侵时,由减压(爆破、沸腾)、减温或化学差异所引起的统一成矿过程。次级隆起和拗陷带的结合部位所发育的北西西向、北北东向深大断裂及其旁侧次级断裂,与北东向断裂的交汇部位提供了理想的成岩成矿环境,矿体的形成受爆破作用形成的岩石裂隙发育程度、围岩层理和层间裂隙以及捕掳体构造的制约和控制。象山群与下伏地层间的断层接触,为构造薄弱部位,导致岩浆的贯入,形成间接控矿条件,见有小矿体产出。岩体形成以后在岩体内产生的构造裂隙及冷凝成岩时的原生裂隙,成为直接的运矿通道和储矿场所;在多组断裂的交汇部位矿化富集程度较高。

5 结束语

沙溪式斑岩铜(金)矿主要找矿标志如下:

(1) 构造标志。大陆板块钙碱性岩浆活动强烈的边缘火山岩浆深成弧及岛弧,深大断裂带附近;象山群(钟山组 J_{1z} 、罗岭组 J_{2l})与下伏地层间的断层接触带,不同方向断裂的交汇部位;岩体中裂隙带密集发育部位;矿化角砾岩及含铜石英脉发育部位。

(2) 岩浆岩标志。具复式岩体特点的中酸性石英闪长斑岩和黑云母石英闪长斑岩体;在矿体的顶部和两侧往往存在较多的晚期脉岩,岩脉也可以作为找矿的间接标志。

(3) 围岩蚀变标志。蚀变带的范围越大对成矿越有利,钾硅酸盐化与成矿关系最为密切;钾质蚀变带及钾质蚀变与青盘岩化叠加带是金属矿物主要的富集空间。

(4) 地表找矿标志。淋滤帽,矿化斑岩由于

硫化物氧化分解,产生亚硫酸根离子,使溶液呈酸性,对周围岩石起褪色漂白作用,形成具星点状流失孔或被褐铁矿替代的淋滤帽, $w(\text{Cu})$ 平均在 200×10^{-6} 左右,其周围也有明显的较高的铜值,形成地化异常环绕在矿床周围。在有褐铁矿、赤铁矿的地方褪色岩石又叠加了黄褐、紫、灰白等杂色,构成区别于其他无矿岩石的独特色调。

(5) 植物标志。找铜矿的植物群常有铜草、海州香薷、石竹、蝇子草、酸模等。

[参 考 文 献]

- [1] 徐兆文,邱检生,任启江,等.安徽沙溪斑岩铜(金)矿床地质地球化学特征及成因[J].地质学报,1999,73(1):95.
- [2] 杨晓勇,杨学明,孙立广,等.沙溪-葛蒲山地区斑岩型铜(金)矿床构造地球化学成矿背景分析[J].安徽地质,1998,8(4):11-15.
- [3] 邱检生,任启江,徐兆文,等.安徽沙溪斑岩铜(金)矿床蚀变岩地质地球化学特征研究[J].南京大学学报,1991,27(2):344-359.
- [4] 任启江,郭国章,徐文艺,等.安徽沙溪斑岩铜(金)矿床成矿过程中热及流体传输的计算模拟[J].南京大学学报,1994,30(2):295-303.
- [5] 常印佛,刘湘培,都 洵,等.长江中下游铜铁硫金(多金属)成矿带成矿远景区划:长江中下游铜铁硫金(多金属)成矿带地质矿产特征、成矿规律及成矿预测[M].北京:地质出版社,1986:52-110.
- [6] 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铜铁成矿带[M].北京:地质出版社,1991:172-176.
- [7] 常印佛,唐永成,邢凤鸣,等.安徽沿江地区铜金多金属成矿预测研究[M].北京:地质出版社,1995:55-115.
- [8] 翟裕生,姚书振,林新多,等.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M].北京:地质出版社,1992.
- [9] 唐永成,邢凤鸣,储国正,等.安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M].北京:地质出版社,1998:46-108.
- [10] 汪祥云.庐江地区环状、隆起构造的控矿作用及找矿方向研究报告[R].合肥:安徽省地质矿产局 327 地质队,1997.
- [11] 查世新.庐枞北部火山-次火山成矿作用过程 REE 分异特征[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2003,26(6):1222-1226.
- [12] 曾键年,覃永军,郭坤一,等.安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时限的约束[J].地质学报,2010,84(4):466-478.
- [13] 江永宏.安徽庐枞地区铁-铜矿成矿规律与找矿[J].世界地质,2010,29(3):372-382.
- [14] 薛怀民,董树文,马 芳.安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄武岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J].地质学报,2010,84(5):664-681.
- [15] 安徽省地质矿产局 327 地质队.安徽省庐江县沙溪铜矿区地质普查成果报告[R].安徽庐江:安徽省地质矿产局 327 地质队,1982.

(下转第 1408 页)

的,鉴定出其中的 5 种组分,包括棕榈酸(a)、硬脂酸(b)、油酸(c)、亚油酸(d)、亚麻酸(e),如图 4 所示,其百分比分别为 29.86%、3.73%、24.07%、38.22% 和 1.34%。黄秋葵籽油富含不饱和脂肪酸,达到 63.63%,单不饱和脂肪酸达到 24.07%,多不饱和脂肪酸达到 39.56%。

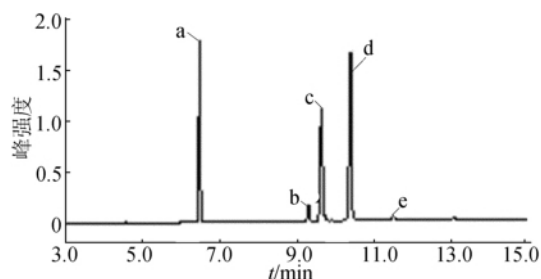


图 4 黄秋葵籽油 GC-MS 图谱

3 结 论

用石油醚为提取剂,本文采用响应曲面法分析的实验结果表明,黄秋葵油脂提取率依赖于液料比、温度和提取时间以及这 3 个因素之间的交互作用。本文建立多项式回归模型来分析实验结果,得出最佳条件为:提取时间 144.421 min、液料比 7.398:1(mL/g)、提取温度 65.3℃。该条件下种子油脂提取率的预测值为 15.72%,然后通过 GC-MS 组分分析得出黄秋葵籽油富含不饱和脂肪酸达到 63.63%,单不饱和脂肪酸达到 24.07%,多不饱和脂肪酸达到 39.56%。

[参 考 文 献]

- [1] 吴燕春,谢金鲜.黄秋葵的研究进展[J].中医药学刊,2005,10(4):1898.
- [2] 董彩文.黄秋葵食用胶的制备及应用研究进展[J].安徽农业科学,2008,36(13):5687-5688.
- [3] 王君耀,周峻,汤谷平.黄秋葵抗疲劳作用的研究[J].中国现代应用药学杂志,2003,20(4):316-317.
- [4] 李建华,陈珊.黄秋葵水提取液抗疲劳的药效学观察[J].中国运动医学杂志,2004,23(2):196-197.
- [5] Hirose K, Endo K, Hasegawa K. A convenient synthesis of lipidimide from okra mucilage and its growth-promoting activity in hypocotyls [J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(1):9-19.
- [6] Wei Z J, Liao A M, Zhang H X, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of silkworm pupal oil applying the response surface methodology [J]. Bioresource Technol, 2009, 100:4214-4219.
- [7] Wei Z J, Zhou L C, Chen H, et al. Optimization of the fermentation conditions for 1-deoxynojirimycin production by streptomyces lawendulae applying the response surface methodology [J]. International Journal of Food Engineering, 2011, 7(3). DOI:10.2202/1556-3758.2354.
- [8] William B. The origin of the soxhlet extractor [J]. Journal of Chemical Education, 2007, 84(12):1913.
- [9] 边侠玲,于莹,姚日生,等.克雷伯氏菌 ZY-B 降解双酚 A 的降解条件优化研究 [J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(9):1382-1386.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1404 页)

- [16] 安徽省地质矿产局 327 地质队.安徽省庐江县沙溪铜矿区铜泉山矿床详细普查地质报告[R].安徽庐江:安徽省地质矿产局 327 地质队,1977.
- [17] 朱训.德兴斑岩铜矿[M].北京:地质出版社,1983:125-130.
- [18] 芮宗瑶.中国斑岩铜(钼)矿床[M].北京:地质出版社,1984:70-110.
- [19] 冶金部地质研究所.中国斑岩铜矿[M].北京:科学出版社,1984:120-150.
- [20] 王濮,潘兆儒,翁玲宝,等.系统矿物学[M].北京:地质出版社,1984:36-98.

- [21] 陈建平,唐菊兴,丛源,等.藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型[J].地质学报,2009,83(12):1887-1900.
- [22] 李文昌,曾普胜.云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(4):436-446.
- [23] 杨富全,闫升好,刘国仁,等.新疆准噶尔斑岩铜矿地质特征及成矿作用[J].矿床地质,2010,29(6):956-971.
- [24] 傅斌,任启江,胡文宣.安徽沙溪斑岩铜矿床成矿流体演化及分布规律[J].矿床地质,1996,15(1):23-33.

(责任编辑 马国锋)