

云南省中甸红牛铜矿床地质地球化学特征

彭惠娟¹ 张长青¹ 周云满² 田 广³

李建新² 罗跃中² 任俊生² 龙 飞²

(1.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;2.云南黄金矿业集团股份有限公司,云南 昆明 650000;

3.中国地质大学,北京 100083)

摘要:云南中甸红牛铜矿床位于三叠纪义敦岛弧南端的中甸弧,是云南三江地区新探明的铜矿床之一,目前探明铜金属资源量已达中型以上规模。本文通过详细的矿体特征、蚀变分带、矿化分带以及元素地球化学特征等方面的研究,认为红牛矿床围岩蚀变及矿化分带在垂向和水平方向都具有典型的矽卡岩型矿床特征,矽卡岩元素地球化学特征明显受大理岩、石英二长斑岩化学组成的影响,矿床为典型的矽卡岩型矿床,推断深部的斑岩体可能有巨大成矿潜力。

关键词:矽卡岩型;角岩型;地质特征;红牛;云南中甸

中图分类号: P618.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1743-16

云南中甸(现称香格里拉县)地处“三江”成矿带中部,义敦岛弧南缘的中甸弧。大地构造位置上位于欧亚和冈瓦纳两大板块的交接部位、特提斯—喜马拉雅造山带东缘。印支期该区形成了金沙江缝合带,甘孜—理塘缝合带及其相应的岛弧岩浆系统和斑岩—矽卡岩型 Cu 矿带^[1-6],该区被认为是研究中生代亚洲大陆增生机制的重要地区^[7-11]。

红牛铜矿位于中甸县格咱乡,坐标范围为东经 99°52′~99°55′,北纬 28°06′~28°09′,面积约 24 km²,海拔标高 4460~4060 m。2004 年由云南省黄金矿业集团股份有限公司勘察发现。截止 2011 年底,红牛铜矿已探明的铜储量为 34.1 万 t,平均品位 1.68%,目前正在继续勘查之中。本文将对该矿床的控矿因素、矿化蚀变和元素地球化学特征进行系统研究,初步探讨其成因。

1 成矿地质背景

义敦岛弧是喜马拉雅巨型造山带中的一个复合

造山带,是三叠纪时期特提斯构造域内扬子地台西缘的甘孜—理塘洋盆向西侧的中甸地块俯冲形成的火山岛弧带^[12-13](图 1)。中甸弧位于义敦岛弧南端,东侧为甘孜—理塘板块结合带南段,西侧是金沙江板块结合带南段。晚二叠世和早三叠世因甘孜—理塘洋的开启,中甸地区裂离扬子陆块,成为夹于金沙江洋与甘孜—理塘洋之间的独立微板块,处于甘孜—理塘洋盆西侧的被动陆缘。中甸岛弧以弧火山岩的大量发育和中酸性岩浆的大规模浅成—超浅成侵位为主要标志。中甸地区地层主要为晚三叠世的一套碎屑岩—碳酸盐岩—火山岩建造,岩性为砂板岩夹灰岩、安山玄武岩—安山岩、英安岩等,划分为曲嘎寺组、图姆沟组、喇嘛哑组。中甸弧主要发育南北向和北西向两组构造(图 1-b),南北向构造使区内岩浆和矿床呈南北向带状分布,北西向构造及其所派生的北东向构造控制了岩体、矿床、矿体或主矿脉的产状。

中甸弧内发育三期岩浆侵入活动,即印支期的岛弧型中—中酸性岩浆侵入活动,燕山晚期后俯冲阶

收稿日期:2012-11-09;改回日期:2012-11-13

项目基金:公益性科研项目(K0904, 200911007)、国家自然科学基金项目(40902029)和云金集团项目“滇西地区金多金属矿成矿规律及成矿系列研究”联合资助。

作者简介:彭惠娟,女,1985年生,博士生,从事矿床学研究;E-mail:54980845@qq.com。

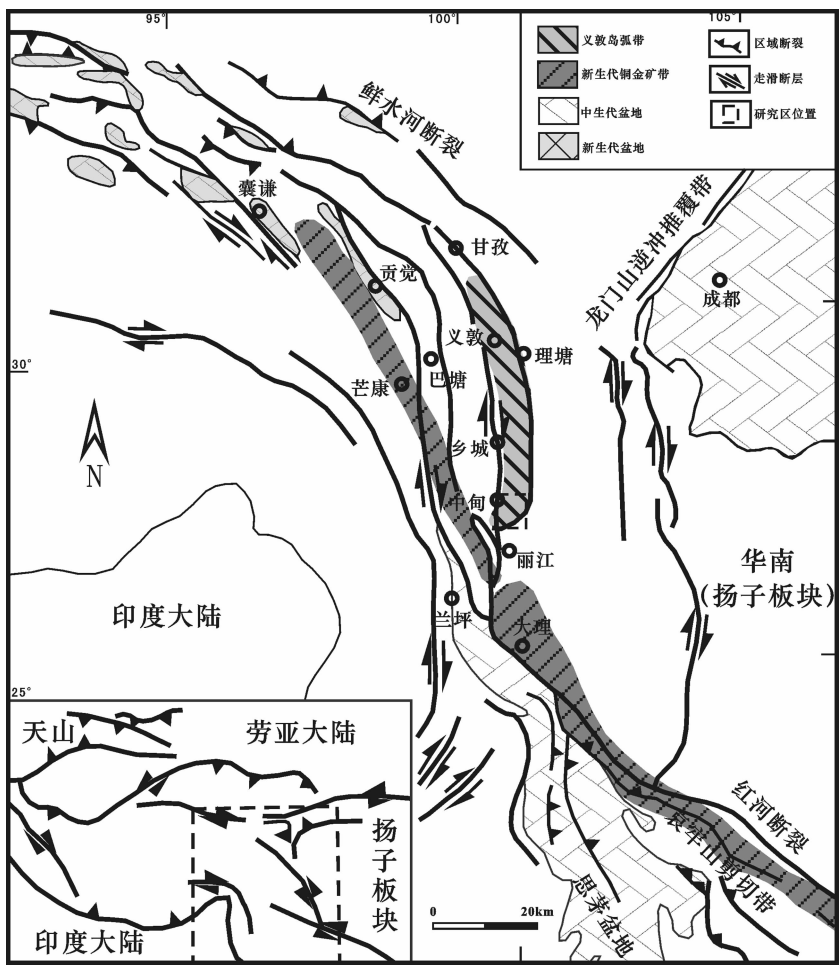


图 1 红牛铜矿大地构造位置^[7]

Fig.1 Geotectonic map of the Hongniu copper deposit^[7]

段弧花岗岩浆侵入活动及喜马拉雅期后陆内走滑环境的正长斑岩—二长斑岩浆侵入活动。分别对应于 3 期成矿作用,即雪鸡坪、普朗等斑岩型矿床为主的铜金多金属矿化,红牛—红山矽卡岩型矿床为主的铜钼矿化,以诺东、东炉房等斑岩型矿床点为主的金铜矿化^[2~4,14~19](图 2)。

2 矿床地质特征

红牛矿区出露地层主要为三叠系上统曲嘎寺组二段灰岩、板岩、变质砂岩夹大理岩及曲嘎寺组三段灰岩夹变质砂岩、板岩。赋矿层位为曲嘎寺组第二亚段大理岩、角岩(图 3)。

矿区位于北西—南东向展布的红山复背斜西翼,总体呈单斜构造。区内断裂构造发育,可划分为两组断层:北西向断层(F_{13})位于矿区西南侧,呈北

西—南东向展布(图 2),是主要的控矿构造。根据钻孔资料分析对比,该断层为向南西陡倾的正断层,矿体沿断层下盘产出;北东向断层(F_{12} 、 F_{14})规模较小,断面南倾,倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,属平移正断层。发育断层破碎带宽 1~2 m,两侧岩石具较强的糜棱岩化和碎裂岩化,为成矿后构造。

矿区东侧出露闪长玢岩及石英二长斑岩,岩浆岩主要呈岩枝、岩脉产出。石英二长斑岩出露于红牛—红山矿区中部(图 3),呈岩枝状顺层产于曲嘎寺组二段的大理岩中,宽 6 m,岩体蚀变较为严重,普遍具绢云母化、绿泥石化;岩体中见稀疏浸染状的辉钼矿。岩体与大理岩间形成了 2~3 m 宽的矽卡岩带,矽卡岩矿物主要有褐红色石榴子石、翠绿色的辉石及少量透闪石;矽卡岩与岩体和大理岩呈渐变关系;矽卡岩中含少量黄铜矿。

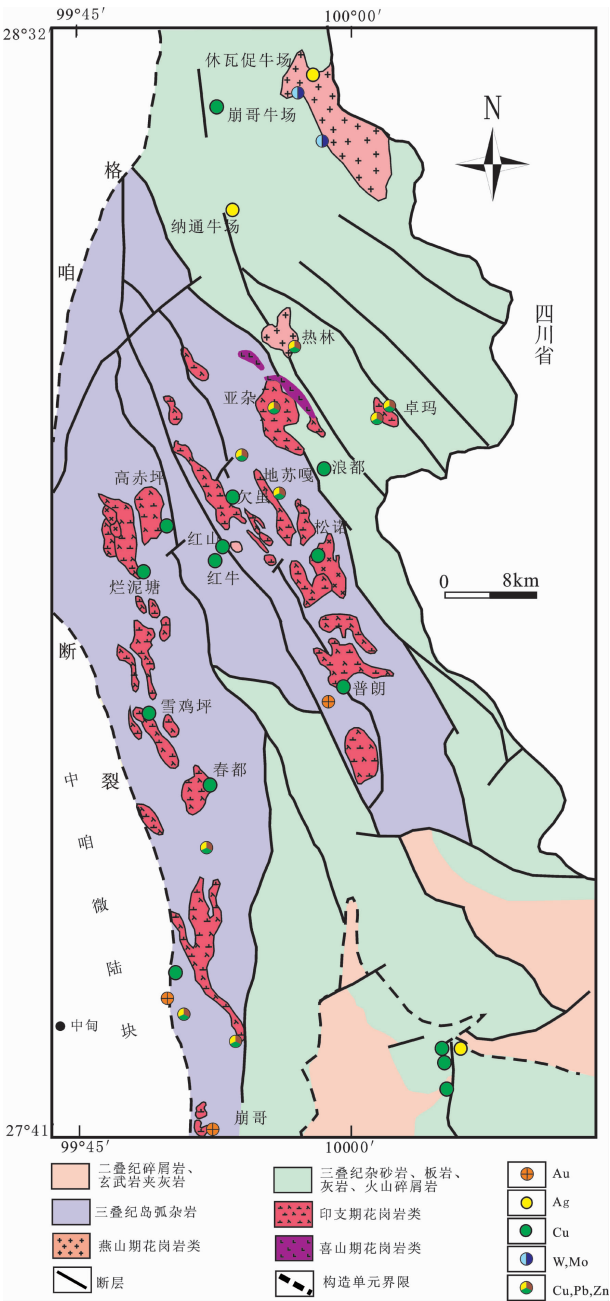


图 2 中甸弧地质矿产简图 [13,15]

Fig.2 Simplified geological map of Zhongdian-arc, showing distribution of mineral resources [13,15]

红牛矿床矿体总体呈北西—南东向平行展布(图 3)。矿体形态多为似层状、脉状、透镜状;地表浅部矿体(4 000 m 标高以上)向南西陡倾,深部转为向北东陡倾(图 4)。矿体的产出主要受断裂构造和地层控制,空间展布方向基本与矿区地层、主构造线方向一致,主要分布在大理岩顶、底面的矽卡岩化带内,其次分布在靠近矽卡岩的透辉石长英角岩中。

根据野外观察,矿区主要有 2 种矿石类型,即块状,浸染状的矽卡岩型矿石和细脉浸染状的斑岩型矿石。①矽卡岩型矿石为矿区最主要的矿石类型,分布于矿区靠近大理岩夹层的矽卡岩带内。矿石具致密块状、稠密浸染状构造,粗—细粒粒状结构,金属矿物主要为细粒黄铜矿,斑点状、斑块状的黄铁矿、磁黄铁矿,部分钻孔深部矽卡岩型矿石中含中细粒辉钼矿,脉石矿物为石榴石、透辉石、透闪石、绿帘石等。②斑岩型矿石在矿区普遍发育,细粒黄铜矿及少量黄铁矿、磁黄矿呈不规则细脉状分布于角岩中,或以浸染状分布于矽卡岩化条带中,脉石矿物有石英、长石、绢云母、透辉石及少量绿帘石、绿泥石、透闪石。

3 矿化蚀变特征

3.1 矿化蚀变作用及成矿阶段划分

根据野外穿插关系、矿石结构构造、围岩蚀变及矿物共生组合等特征,将红牛矿床形成过程从早到晚分为接触变质阶段、接触交代变质阶段(矽卡岩阶段)、退化蚀变阶段、石英—硫化物阶段和碳酸盐阶段(表 1)。接触变质阶段主要形成大理岩和角岩;矽卡岩阶段形成主要由石榴石、辉石、硅灰石组成的矽卡岩;退化蚀变阶段主要矿物有:透闪石、阳起石、绿帘石和绿泥石,矿石矿物(黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、辉钼矿)大多集中在退化蚀变阶段和石英—硫化物阶段形成,闪锌矿集中在石英—硫化物阶段晚期和碳酸盐阶段形成。

(1)热接触变质阶段:早阶段热接触变质作用引起曲嘎寺组灰岩夹层变为大理岩(图 5-a),砂板岩、板岩变为角岩。在红牛及相邻的红山矿区,角岩化接触变质晕范围达 20 km²。红牛矿区角岩多呈灰白色、紫红色,具有半定向的斑点状变成构造和条带状变余构造,矿物粒度细,体现原沉积岩的分布特性;光学显微镜下无法识别斑点或条带状集合体矿物的晶形(图 5-b,c);矿物共生组合主要为钠长石+黑云母+石英+绢云母;岩性主要为黑云母角岩、长英角岩。这种角岩的矿化一般较弱,金属矿物仅可见呈浸染状分布的黄铁矿。

(2)接触交代变质(矽卡岩阶段):交代变质作用主要表现为矽卡岩化,本矿区块状矽卡岩主要以钙矽卡岩为主,一般发育于曲嘎寺组大理岩夹层两侧;由于原岩为大理岩,矽卡岩矿物组成十分简单,主要

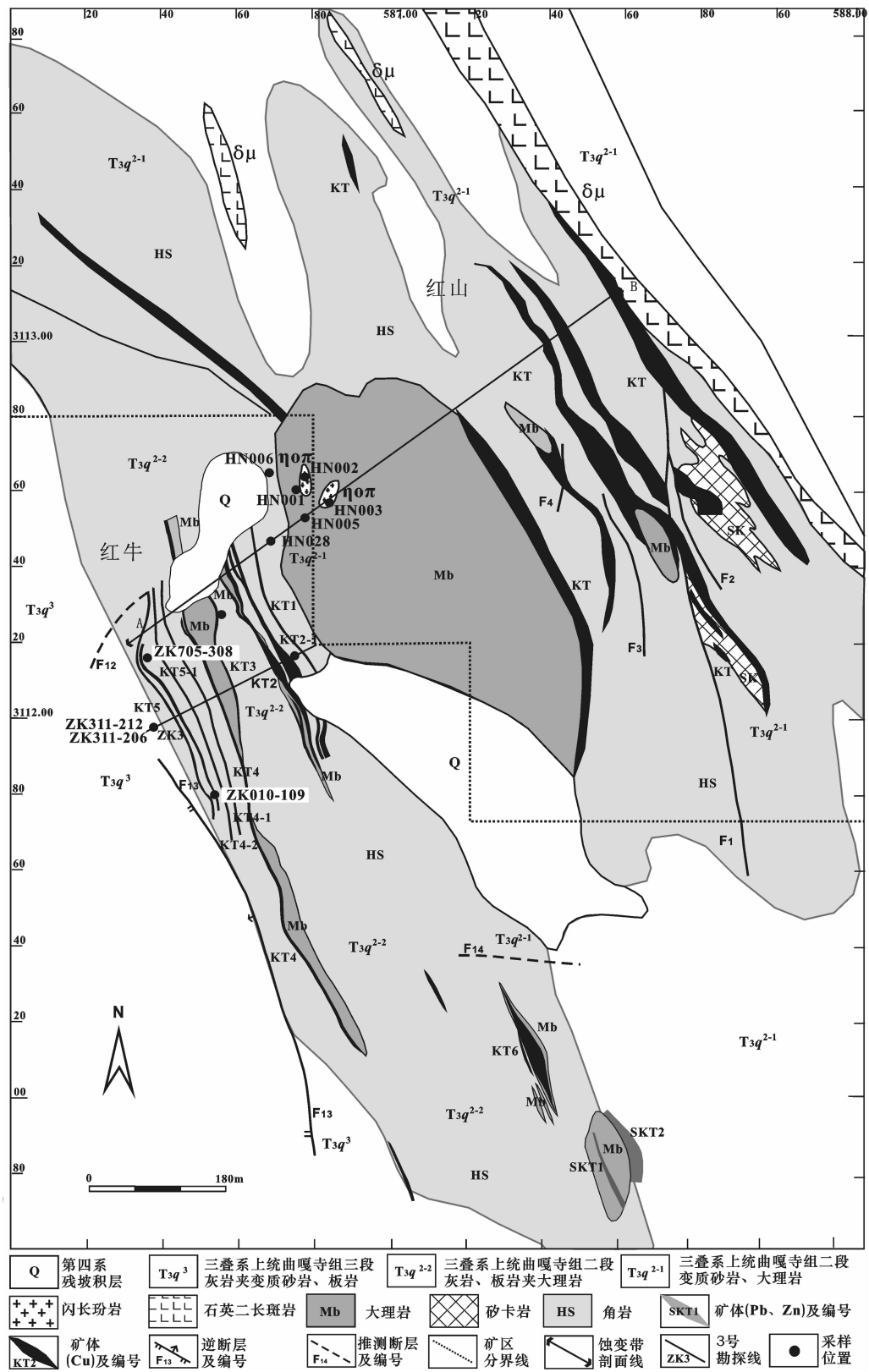


图 3 红牛矿区及邻区地质图(据香格里拉县红牛铜矿详查报告修改)
Fig.3 Geological map of the Hongniu ore district and neighboring areas

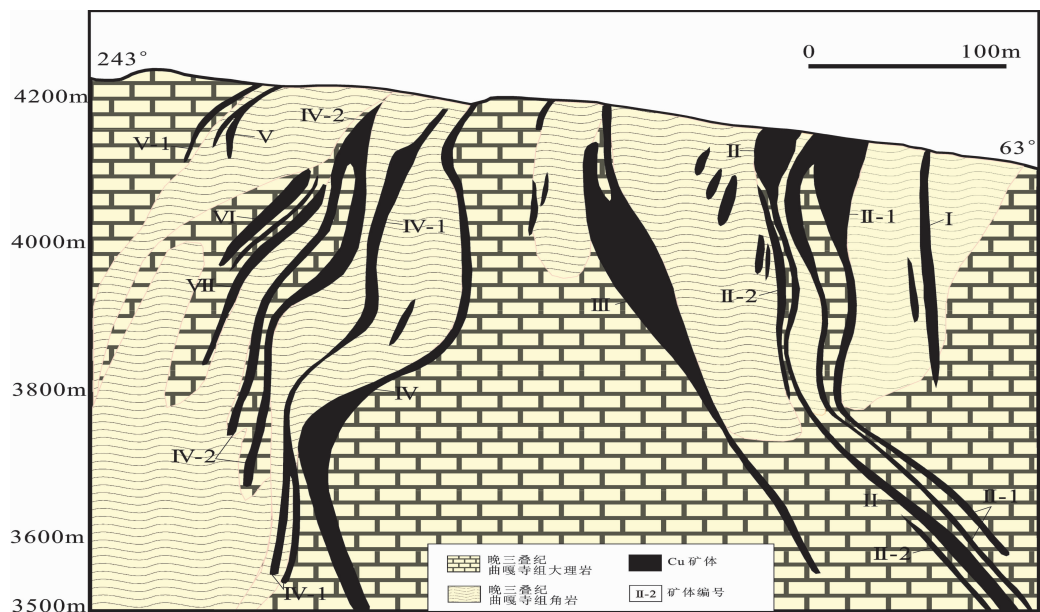
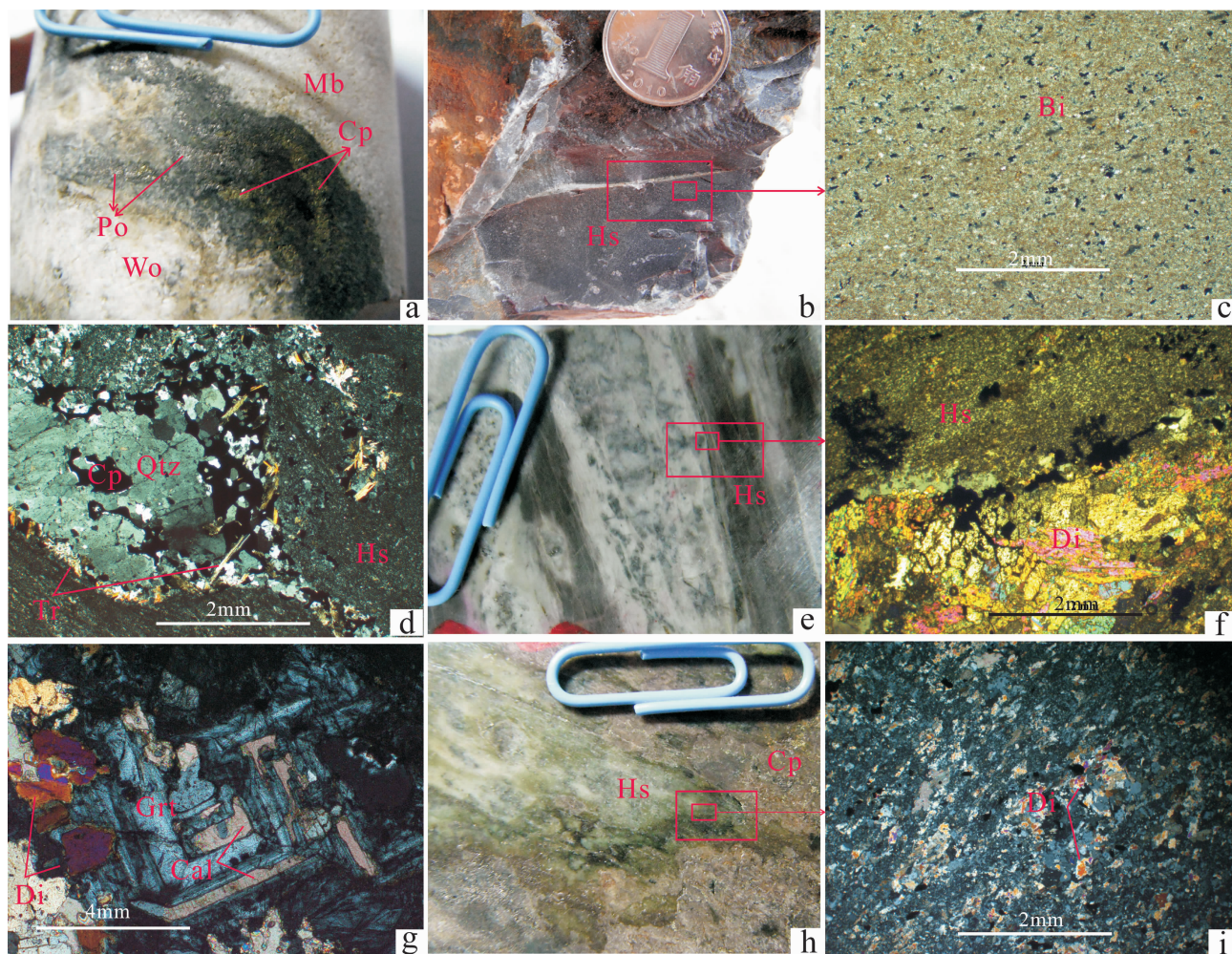


图 4 红牛铜矿 3 勘探线地质剖面图

Fig.4 Geological section along No. 3 exploration line in the Hongniu copper deposit

表 1 红牛铜矿床矿物生成顺序

成矿阶段	接触变质阶段	矽卡岩阶段	退化蚀变阶段	石英-硫化物阶段	碳酸盐阶段
黑云母	■				
钠长石	■				
绢云母	■				
石 英	■	■	■	■	■
硅灰石		■	■		
辉 石		■	■		
石榴石		■	■		
斧山石		■	■		
绿帘石			■	■	
绿泥石			■	■	
透闪石		■	■	■	
阳起石		■	■	■	
磁铁矿			■	■	
辉钼矿			■	■	■
黄铜矿			■	■	■
黄铁矿			■	■	■
斑铜矿			■	■	
磁黄铁矿			■	■	■
方解石			■	■	■
闪锌矿				■	■
萤 石					■
石 膏					■



a—ZK311-489 大理岩与硅灰石矽卡岩接触面上的黄铜矿-磁铁矿化;b,c—HN028 黑云母角岩(c.单偏光);d—ZK010-249 一条带状黑云母角岩,沿石英硫化物脉边缘发育透闪石(正交偏光);e,f—ZK010-109 条带状角岩(f.正交偏光);g—ZK311-212 石榴石矽卡岩,晚期方解石沿石榴石环带交代(正交偏光);h,i—透辉石角岩型矿石(i.正交偏光)。图中小方框部分为显微照片,大方框为切片位置。Mb—大理岩;Hs—角岩;Wo—硅灰石;Bi—黑云母;Grt—石榴石;Di—透辉石;Tr—透闪石;Cal—方解石;Cp—黄铜矿;Po—磁黄铁矿;Bn—斑铜矿

图 5 红牛矿区岩石样品照片

Fig.5 Rock sample photographs of the Hongniu ore district

有石榴石、辉石、透闪石、符山石、硅灰石。其次,交代变质作用常与接触变质作用相叠加,使含钙泥质岩同时发生角岩化和矽卡岩化。在本矿区,主要表现为角岩的颜色、结构、构造等外在特征发生明显变化,该类角岩呈灰绿色、浅绿色、灰白色,具有斑状变晶结构,变斑晶一般为透辉石。发生交代变质作用的角岩大多为长英质角岩,形成块状的透辉石长英角岩(图 5-h,i);或沿黑云母角岩中的钙质硅酸盐角岩薄层交代,形成含透辉石的条带状角岩(图 5-e,f)。

(3)退化变质阶段:矿区矽卡岩及角岩普遍发生退化蚀变现象。次透辉石、透闪石、阳起石、绿帘石呈细脉状、网脉状叠加于矽卡岩、透辉石长英角岩之

上,沿节理、裂隙或岩性界面交代透辉石和石榴石等矿物,在交代强烈地段常见石榴石残余体,或在石榴石消失后由透闪石、磁铁矿、方解石沿晶体环带排列成其假象(图 5-g)。黑云母角岩往往也发生退化变质作用,由黑云母、石英、钠长石等组成的斑点状集合体,在后期热液作用下,黑云母退变质为绿泥石或绿帘石,导致斑点颜色由黑色转为绿色或浅绿色。

(4)石英-硫化物阶段:形成大量黄铜矿、磁黄铁矿等金属矿物。矿化作用一般与退化蚀变作用关系密切,常在透闪石、阳起石、绿帘石发育的部位,充填有大量黄铜矿、磁黄铁矿,形成块状、浸染状的矽卡岩型和在角岩中发育的斑岩型矿石;退化蚀变矿物

脉也常与石英、方解石、萤石、黄铜矿、磁黄铁矿一起形成细脉浸染型矿石(图 5-d)。在石英-硫化物阶段晚期,形成石英脉型的铁闪锌矿矿石。

(5)碳酸盐阶段:主要形成方解石脉,这些方解石脉体切断早期的石英脉及石英-硫化物脉,且沿方解石脉体边缘发育少量黄铜矿。

2.3.2 蚀变及矿化分带

岩心综合编录表明,矿区垂向蚀变明显受原沉积岩岩性控制,形成一个或多个由角岩-矽卡岩-大理岩组合形成的蚀变带。单个角岩-矽卡岩-大理岩组合具有明显的蚀变分带特征(图 6),自上到下依次为:块状黑云母角岩→条带状黑云母角岩(含斑点角岩)→透辉石长英角岩→石榴石-透辉石矽卡岩→硅灰石-透辉石-石榴石矽卡岩→石榴石-硅灰石矽卡岩→大理岩,其中透辉石长英角岩和矽卡岩为主要的含矿层。就整个垂向分带来讲,表现为上述蚀变分带的一部分或者多次叠加,并且具有一定的变化规律。由浅部到深部,矽卡岩中石榴石含量明显增多,浅部石榴石多呈棕黄色或肉粉色,镜下为自形晶,粒度<0.2 mm,无环带结构;深部红褐色、褐色石榴石逐渐增多,粒度>0.5 mm,具明显环带结构。此外,部分钻孔(如 ZK010, ZK701)深部退化蚀变作用逐渐加强,出现了以透闪石、阳起石、绿帘石为主的蚀变岩和绿泥石条带。

红牛矿区矽卡岩分布受大理岩夹层控制,就矽卡岩矿物特征及组合来看,由西向东具有一定的水平分带。以石英二长斑岩岩枝的出露位置为中心,做矿区 AB 剖面蚀变分带图(剖面位置见图 2)。石英二长斑岩北东方向依次发育深褐色、粗晶(>50 mm)、具有明显的环带结构的钙铁榴石矽卡岩→棕红色、中细粒(30~50 mm)钙铁榴石透辉石矽卡岩→淡绿色辉石与肉红色、细粒(<20 mm)石榴石相间产出的层纹状石榴石-透辉石矽卡岩→钙硅酸盐角岩(透辉石角岩);向南西方向依次为肉红色、褐黄色中细粒(30~50 mm)钙铁-钙铝榴石矽卡岩→透辉石-石榴石矽卡岩→硅灰石矽卡岩→透辉石角岩(图 7)。

红牛矿区矿化分带较明显,以石英二长斑岩的出露位置为中心,向两侧依次为:辉钼矿-黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿→黄铜矿>黄铁矿-磁黄铁矿-斑铜矿→磁黄铁矿-黄铁矿±斑铜矿>黄铜矿±斑铜矿→铁闪锌矿-黄铁矿(红山矿区)(图 7)。值得一提

的是,红牛矿区矿体中虽然未发现独立银矿物,但组合分析结果显示工业矿体中普遍含银,且含量达 3.69~66.1 g/t,伴生银主要赋存在黝铜矿中。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

红牛矿床岩石样品元素分析结果见表 2(采样位置见图 3)。主元素测试采用 X 射线荧光分析,仪器型号为 ARL ADVANT XP+(美国热电公司),分析误差<1%。微量元素及稀土元素测试采用 ICP-MS,仪器型号为美国安捷伦科技有限公司电感耦合等离子体质谱仪 Agilent ICPMS 7500ce,德国相干公司(Coherent)准分子激光器 COMPexPro102,分析误差<5%。

石英二长斑岩 SiO_2 平均含量分别为 62.52%, $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 平均含量 9.66%,并且 K_2O 含量均高于 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均在 4.86,属于碱性岩。铝饱和指数为 0.76。山德指数 A/CNK 平均为 1.02,属于弱过铝质。 $\text{Mg}^\#$ 平均为 0.44, FeO^*/MgO 平均为 1.24。分异指数(DI)平均为 70,反应岩浆分异程度中等。矽卡岩化斑岩样品采于石英二长斑岩与大理岩透镜体接触带靠近岩体一侧,与石英二长斑岩相比, SiO_2 含量明显降低(39.81%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值升高(5.18), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 降低到 1.05%, CaO 急剧升高,变为 33.57%,甚至高于矽卡岩平均含量。代表性矽卡岩的化学成分变化较小, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 平均含量分别为 49.2%, 8.3%, 10.45%, 和 23.11%,具有钙质矽卡岩富硅、富铝、富钙,低铁、低镁的特征。矽卡岩化角岩中各主元素含量介于矽卡岩和角岩之间, SiO_2 平均含量为 60.49%, CaO 为 7.34%。角岩 SiO_2 含量变化范围不大,平均为 64.18%; Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O 平均含量分别为 16.28%, 3.25%, 4.88%, 1.86% 和 4.6%,具有富硅、富铝,低钾、低钙的特征。三叠系上统曲嘎寺组二段大理岩中 SiO_2 、 CaO 含量分别为 2.35%, 52.74%。

4.2 稀土元素与微量元素

岩石稀土和微量元素组成测试结果列于表 3。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线如图 8 所示,所有样品 REE 分布模式均为向右倾斜的平滑曲线。石英二长斑岩的 ΣREE 平均为 $267.59 \mu\text{g/g}$, LREE/HREE 平均为 19.02, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均 31.24, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 平均为 6.01, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 平均为 4.04, δEu 平均 0.56。

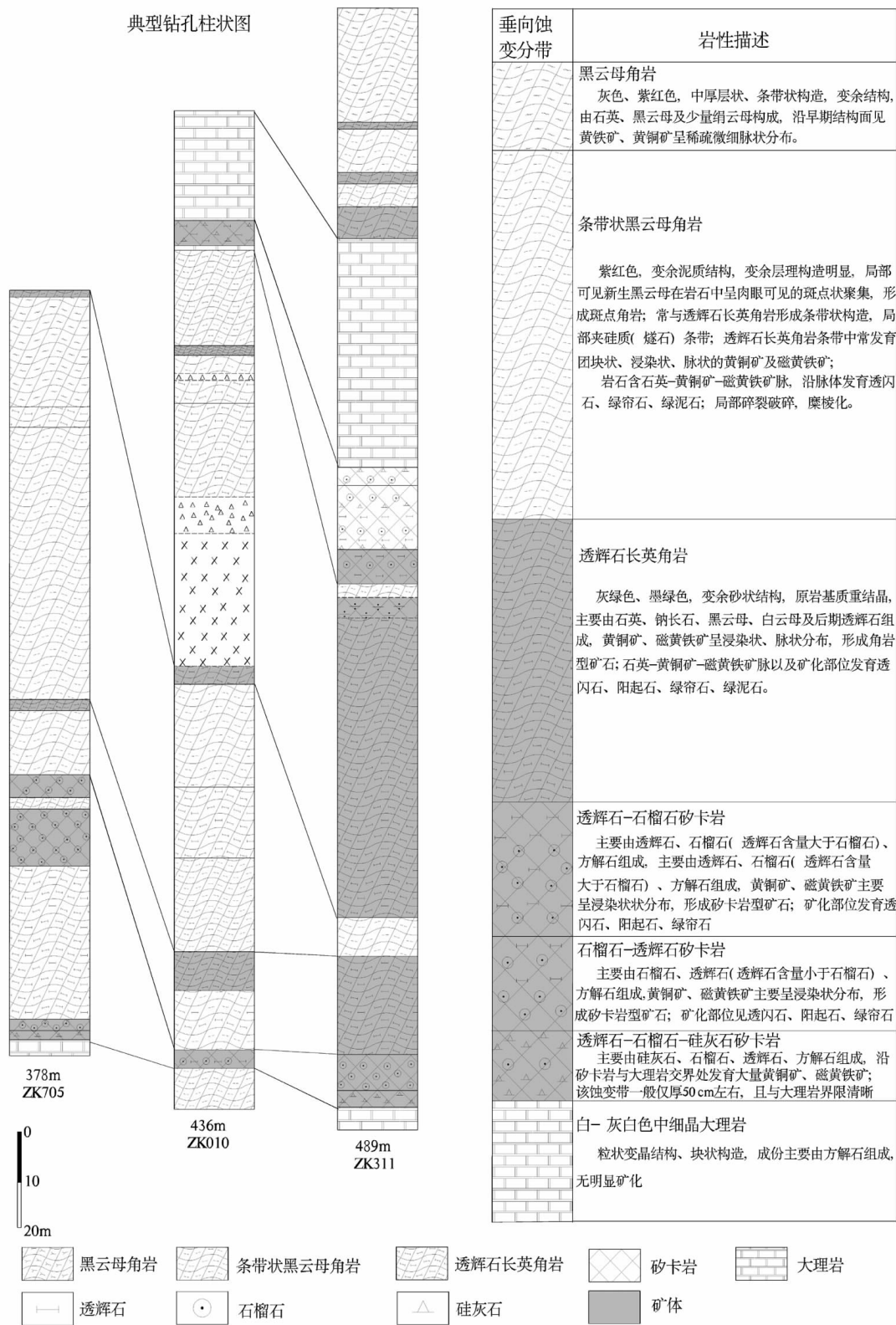


图 6 红牛矿区典型钻孔柱状图及垂向蚀变分带

Fig.6 Column of typical drill holes and vertical alteration zoning in the Hongniu copper deposit

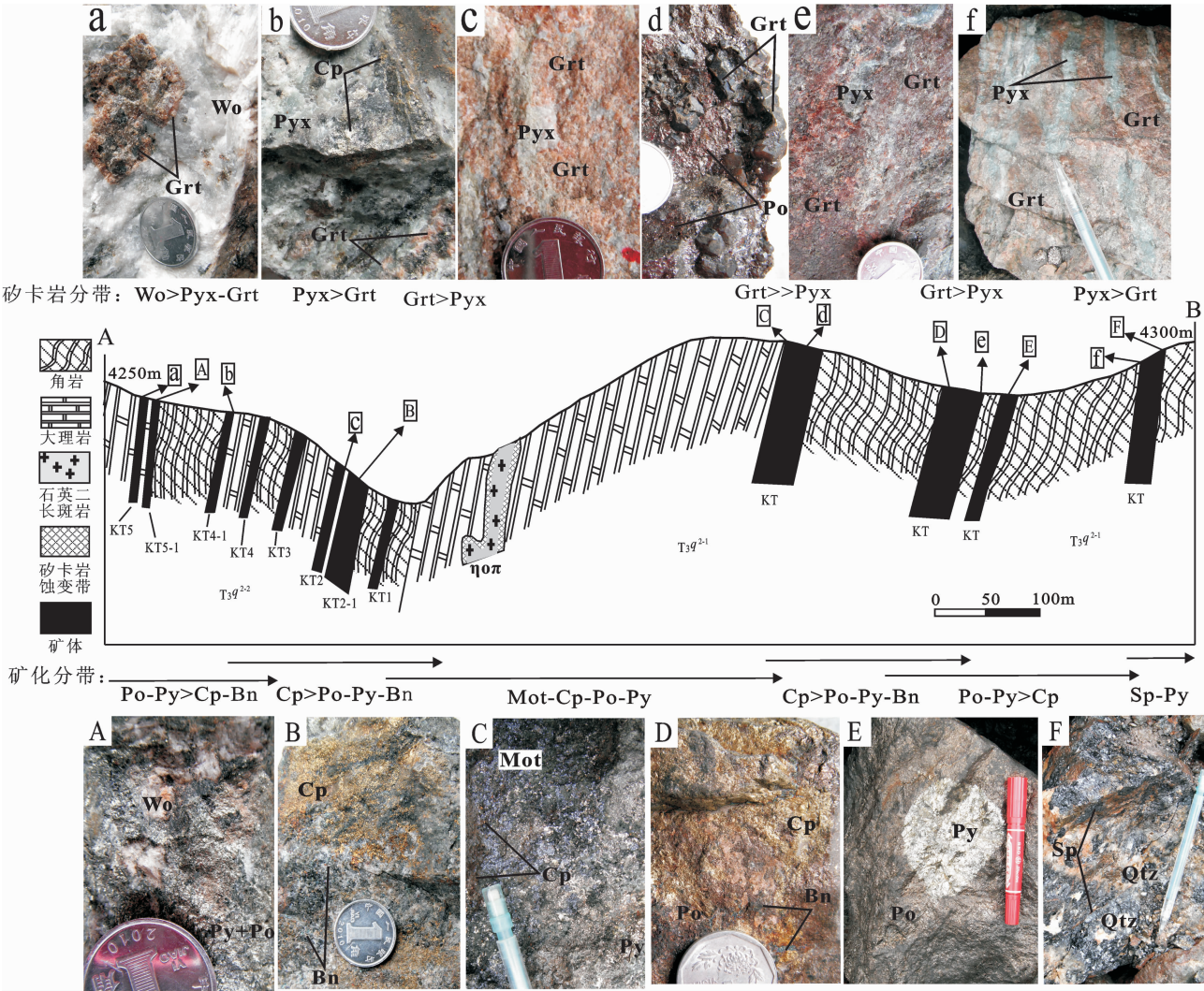


图 7 红牛矿区 AB 剖面矽卡岩及矿化分带
Wo-硅灰石;Grt-石榴石;Pyx-辉石;Qtz-石英;Cp-黄铜矿;Po-磁黄铁矿;Py-黄铁矿;Mot-辉钼矿;Bn-斑铜矿;Sp-闪锌矿
Fig.7 Skarn and mineralization zoning along AB profile in the Hongniu ore district

表 2 红牛矿区主要岩石样品常量元素分析结果/%

Table 2 Analytical results of major elements of main rock samples from the Hongniu ore deposit													
样品编号	样品名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
HN002	石英二长斑岩	63.98	15.01	1.27	6.02	1.15	6.90	2.10	0.038	0.669	0.343	1.96	99.45
HN003	石英二长斑岩	61.06	16.49	1.87	4.60	1.35	8.41	1.31	0.040	0.794	0.370	2.84	99.12
HN001	矽卡岩化斑岩	39.81	13.76	7.49	33.57	2.14	0.88	0.17	0.481	0.776	0.174	-	99.26
ZK705-308	矽卡岩	48.40	8.38	12.73	22.60	2.07	0.41	0.08	0.324	0.382	0.092	0.99	96.46
ZK311-212	矽卡岩	50.00	8.28	8.17	23.62	1.32	3.13	0.38	0.253	0.376	0.099	3.00	98.62
ZK010-109	矽卡岩化角岩	58.91	15.27	3.56	8.60	2.68	4.83	1.14	0.030	0.871	0.171	2.93	98.99
ZK311-206	矽卡岩化角岩	62.08	16.76	2.15	6.08	1.80	6.11	1.31	0.023	0.798	0.100	1.98	99.18
HN006	角岩	66.90	15.77	2.51	2.75	2.04	5.33	2.69	0.012	0.811	0.144	0.71	99.66
HN028	角岩	61.47	16.79	3.99	6.96	1.88	3.87	1.83	0.022	0.746	0.120	1.28	98.95
HN005	大理岩	2.35	0.67	0.68	52.74	0.37	0.05	0.06	0.069	0.009	0.005	42.27	99.27

注:样品测试由北京大学造山带与地壳演化重点实验室完成,采用顺序式 X 射线荧光光谱仪测定。

表 3 红牛矿区岩石样品稀土及微量元素丰度数据/10⁻⁶

Table 3 Analytical results of REE and trace elements in main rock samples from the Hongniu deposit

样品编号	HN002	HN003	HN001	ZK705-308	ZK311-212	ZK010-109	ZK311-206	HN006	HN028	HN005
样品名称	石英二长斑岩	石英二长斑岩	矽卡岩化斑岩	矽卡岩	矽卡岩	矽卡岩化角岩	矽卡岩化角岩	角岩	角岩	大理岩
La	71.29	52.66	101.15	10.42	15.38	15.40	30.41	32.01	26.15	1.36
Ce	135.16	106.95	162.82	21.91	28.84	35.56	66.17	71.62	57.85	2.49
Pr	14.63	11.82	17.35	2.91	3.86	4.31	7.85	8.14	6.71	0.28
Nd	49.49	42.85	60.67	13.99	18.51	19.08	32.69	32.12	27.09	1.06
Sm	10.50	10.07	11.21	3.95	5.50	5.15	8.06	7.17	6.07	0.21
Eu	1.55	1.52	1.98	1.44	1.07	1.01	1.46	1.03	1.12	0.03
Gd	5.94	5.55	7.60	4.81	5.98	4.63	6.57	5.66	4.86	0.13
Tb	0.64	0.64	1.00	0.79	0.97	0.78	0.99	0.83	0.73	0.02
Dy	3.01	3.07	5.72	4.78	5.79	5.11	6.02	5.00	4.43	0.11
Ho	0.53	0.54	1.15	0.99	1.14	1.05	1.22	1.02	0.91	0.02
Er	1.55	1.53	3.59	2.75	3.28	3.18	3.75	3.12	2.90	0.07
Tm	0.22	0.22	0.55	0.43	0.50	0.49	0.56	0.51	0.46	0.01
Yb	1.43	1.41	3.60	2.95	3.32	3.24	3.86	3.47	3.27	0.07
Lu	0.21	0.20	0.53	0.44	0.49	0.48	0.57	0.52	0.49	0.01
Y	16.16	16.73	34.25	31.41	41.84	32.90	41.45	31.75	29.21	1.00
ΣREE	296.15	239.04	378.91	72.56	94.61	99.46	170.20	172.22	143.04	5.87
LREE	282.62	225.88	355.18	54.62	73.15	80.50	146.65	152.09	124.98	5.43
HREE	13.53	13.16	23.73	17.95	21.46	18.96	23.55	20.13	18.07	0.44
LREE/HREE	20.88	17.16	14.97	3.04	3.41	4.25	6.23	7.55	6.92	12.21
(La/Yb) _N	35.66	26.81	20.16	2.54	3.32	3.41	5.65	6.61	5.73	14.54
δEu	0.55	0.56	0.62	1.01	0.57	0.62	0.59	0.48	0.61	0.48
δCe	0.97	1.01	0.87	0.96	0.89	1.05	1.02	1.06	1.04	0.94
Li	9.54	27.07	12.19	10.14	5.63	11.47	18.41	34.98	15.32	0.37
Be	4.74	3.52	5.44	0.70	0.99	1.90	3.09	2.88	2.70	0.06
P	1661.27	1870.49	612.71	319.87	420.21	829.86	498.20	761.32	566.87	14.47
Sc	5.25	7.20	17.87	6.39	7.94	25.07	18.49	15.75	19.36	0.26
Ti	4543.29	5143.23	4186.55	2269.86	2263.85	5206.61	4916.00	4659.3	4667.15	6.90
Mn	284.12	241.87	3023.12	2158.45	1705.91	216.99	165.94	88.89	161.78	374.56
Rb	402.73	462.76	51.21	17.89	136.65	218.35	311.37	301.77	186.80	2.47
Sr	379.64	330.71	30.77	12.47	103.30	284.60	280.13	169.86	292.17	117.42
Zr	265.49	229.14	135.90	69.80	98.74	122.96	188.97	181.01	140.62	0.75
Nb	43.31	45.97	10.11	5.14	5.71	7.63	11.91	19.44	10.95	0.01
Cd	0.32	1.48	1.77	3.14	1.00	0.19	0.43	0.30	0.17	1.06
Sn	2.26	3.65	5.74	13.54	7.83	3.68	4.38	2.02	5.18	2.59
Cs	19.26	11.37	5.18	0.79	2.89	5.41	9.43	24.85	5.41	0.44
Ba	1393.66	1541.95	66.04	44.95	501.40	576.15	1125.65	651.79	505.00	19.80
Hf	6.13	5.49	4.05	2.18	2.98	3.37	5.52	4.89	4.10	0.01
Ta	1.75	1.76	0.88	0.36	0.41	0.45	0.65	0.88	0.61	0.12
W	110.61	14.10	83.15	2.25	5.06	4.07	7.49	2.54	2.39	6.78
Tl	1.34	1.68	0.19	0.09	0.47	0.88	1.28	1.85	0.75	0.05
Th	24.73	22.29	13.33	4.51	3.99	4.85	10.51	12.87	9.91	0.03
U	4.65	3.68	9.10	1.69	1.29	1.41	2.41	2.93	2.21	1.74
Se	0.03	0.04	0.10	0.20	0.13	0.10	0.08	0.06	0.09	0.07

注:样品测试由北京大学造山带与地壳演化重点实验室完成,采用电感耦合等离子体质谱仪 ICPMS 7500ce 测定。

以上结果显示,岩体的稀土总量较高(均大于200 μg/g),稀土分馏明显[LREE/HREE均大于12,(La/Yb)_N>15],轻稀土富集,重稀土亏损[(La/Sm)_N>1,(Gd/Yb)_N>1];Eu明显负异常,反映了岩石在形成的过程中发生过明显的斜长石分离结晶作用。矽卡岩化斑岩ΣREE明显升高,达378.91 μg/g,稀土分馏程度降低[LREE/HREE为14.97,(La/Yb)_N为20.16],轻稀土更加富集,而重稀土亏损程度降低[(La/Sm)_N为9.03,(Gd/Yb)_N为2.11]。矽卡岩的稀土总量平均为83.59 μg/g,轻重稀土分馏不明显[LREE/HREE平均为3.23,(La/Yb)_N平均2.93],轻稀土略微富集,重稀土轻微亏损[(La/Sm)_N平均为2.72,(Gd/Yb)_N平均1.72],δEu平均为0.79,总体上Eu表现为弱负异常特征。矽卡岩化角岩各特征参数均

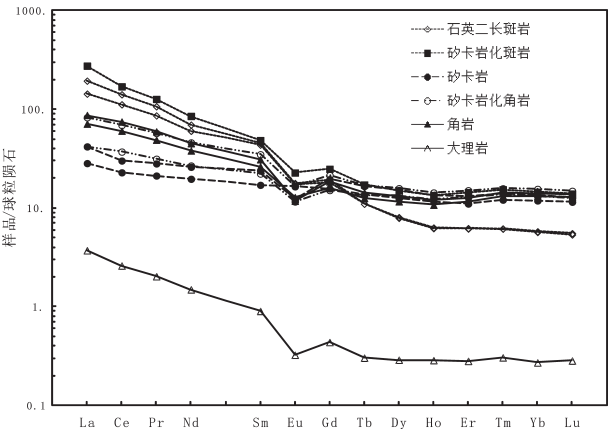


图 8 红牛矿区主要岩石样品稀土元素丰度配分曲线图
(球粒陨石值采用 Taylor and McLennan,1985)

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of main rock samples from the Hongniu deposit

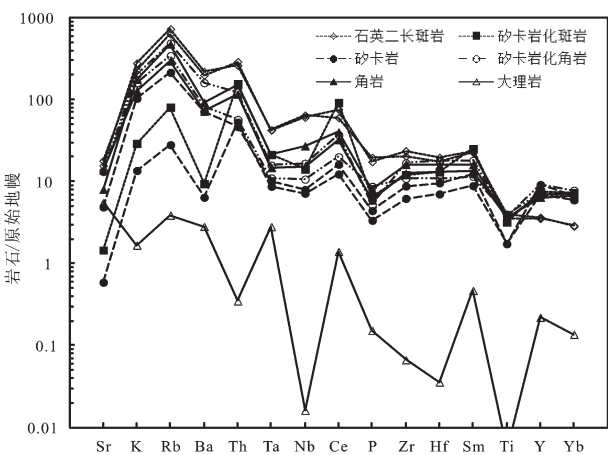


图 9 红牛矿区主要岩石样品微量元素蛛网图
(原始地幔值采用 Sun and McDonough,1989)

Fig.9 Primary mantle-normalized trace elements patterns of main rock samples from the Hongniu deposit

表 4 红牛矿区岩石样品成矿元素丰度数据 (10⁻⁶, Cu、Fe/%)

Table 4 Analytical results of metallogenic elements in main rock samples from the Hongniu deposit

样品编号	样品名称	Cu	Au	Ag	Pb	Zn	As	Mo	Fe	Co	Ni	V	Cr
HN002	石英二长斑岩	0.04	0.06	4.64	12.49	79.48	0.37	6.52	0.89	2.99	7.37	45.51	23.07
HN003	石英二长斑岩	0.25	0.06	2.83	137.76	300.12	0.59	0.94	1.31	4.74	12.14	44.44	21.74
HN001	矽卡岩化斑岩	0.01	0.03	0.45	16.37	103.87	11.89	1343.12	5.24	8.76	12.14	87.67	34.72
ZK705-308	矽卡岩	0.93	0.03	11.55	15.44	470.27	0.10	5.96	8.91	19.48	6.39	75.08	21.11
ZK311-212	矽卡岩	0.16	0.02	2.93	18.78	171.92	0.38	1.08	5.72	18.03	15.94	59.27	33.66
ZK010-109	矽卡岩化角岩	0.02	0.02	0.25	9.85	52.27	0.43	2.62	2.49	9.45	55.97	152.90	56.64
ZK311-206	矽卡岩化角岩	0.11	0.02	1.44	7.10	85.02	0.10	2.39	1.51	5.89	20.04	127.03	57.24
HN006	角岩	0.02	0.04	0.23	8.15	52.31	0.42	1.17	1.76	4.43	19.39	89.66	49.70
HN028	角岩	0.03	0.02	0.29	8.60	51.75	0.25	0.58	2.79	11.71	28.24	119.42	59.44
HN005	大理岩	0.33	0.00	6.03	65.46	177.73	0.73	0.36	0.48	10.05	8.78	6.46	6.22
大陆地壳 (Taylor,1985)		0.01	3.00	0.08	8.00	80.00	1.00	1.00	7.07	29.00	105.00	230.00	185.00

注:样品测试由北京大学造山带与地壳演化重点实验室完成,采用电感耦合等离子体质谱仪 ICPMS 7500ce 测定。

介于矽卡岩和角岩平均值之间,ΣREE 随矽卡岩化程度的不同具有较大差异,平均值为 134.83 μg/g, LREE/HREE 平均为 5.24, (La/Yb)_N 平均 4.53, (La/Sm)_N 平均为 3.38, (Gd/Yb)_N 平均为 1.57, δEu 平均 0.61, 表现为弱负异常特征。角岩的 ΣREE 较高, 平均为 157.63 μg/g, 高于矽卡岩平均值; 轻重稀土分馏明显 [LREE/HREE 平均为 7.24, (La/Yb)_N 平均为 9.93], 轻稀土明显富集, 重稀土轻微亏损 [(La/Sm)_N 平均为 6.17, (Gd/Yb)_N 平均为 1.56], δEu 平均 0.54, 表现为负异常。三叠系上统曲嘎寺组二段大理岩中 ΣREE 值为 5.87 μg/g, 轻重稀土分异较明显, [LREE/HREE 高达 12.21, (La/Yb)_N 为 14.54], 轻稀

土富集, 重稀土亏损 [(La/Sm)_N 为 6.55, (Gd/Yb)_N 为 1.85], δEu 为 0.48, 表现为负异常特征。
在微量元素原始地幔标准化图解中 (图 9), 石英二长斑岩微量元素配分曲线呈右倾趋势, 强烈富集 Rb, 说明岩浆分异作用进行的较为充分; Sr 强烈亏损可能与斜长石大量分离有关。P 和 Ti 的轻度亏损说明磷灰石和钛铁矿已开始从岩浆中强烈分离, 因此石英二长斑岩属于高分异的长英质花岗岩^[20]。矽卡岩化斑岩大离子亲石元素 Rb 明显富集, Sr, Ba 明显亏损; 高场强元素 Ti, Nb 明显亏损, Ce 富集。矽卡岩和角岩中大离子亲石元素 Sr, Ba 表现为亏损, Rb 富集; 在高场强元素 Ti 负异常, Ce 富集。大理岩

富集大离子亲石元素 Sr,Rb,Ba, 亏损 K;Nb,Zr,Hf,Ti 等高场强元素为负异常,Ce 明显富集。

4.3 成矿元素

矿区代表性岩石总体富集除 Au 以外的亲铜元素,亏损亲铁元素。Cu 在大理岩、石英二长斑岩以及矽卡岩中含量较高,角岩中含量最低;矽卡岩化斑岩中 Mo 含量较高;Ag 主要富集于矽卡岩中,角岩中含量最低。

5 矿床成因讨论

5.1 矽卡岩成因的探讨

红牛矿区地质特征及矽卡岩矿石交代结构表明,红牛矽卡岩的形成与接触交代作用密不可分。在空间上,红牛矽卡岩具有显著的蚀变分带特征,主要表现为矽卡岩矿物组合、成矿元素组合以及石榴石特征的变化。矽卡岩与大理岩和岩浆岩在稀土元素和微量元素组成上也具有一定的亲缘关系。可以认为岩浆热液沿构造通道从深部脉动上升,充填交代围岩而形成矽卡岩及矿体,其原因有:

(1)本区自石英二长斑岩到大理岩,岩石化学成分发生明显变化,由石英二长斑岩形成的石榴石透辉石矽卡岩 (HN001)SiO₂,Al₂O₃,Na₂O,K₂O 被带出,而 Fe₂O₃,MgO,MnO,CaO 等大量带入,从而形成富 Ca,Mg,Fe 的硅酸盐矿物组合。靠近大理岩一侧,由大理岩形成的透辉石硅灰石矽卡岩,SiO₂ 被大量带入,Na₂O,K₂O 少量带入,而 CaO 大量带出。这种变化规律可总结为 SiO₂,Al₂O₃ 均由岩体向大理岩方向迁移;CaO 自大理岩向石英二长斑岩迁移;形成矽卡岩的铁质则可能来源于岩浆热液。在这种元素迁移过程中,由于各元素的迁移范围不同,因此形成了矽卡岩分带。其次,矽卡岩与石英二长斑岩具有极为相似的稀土配分曲线形式,也表明矽卡岩与侵入岩有一定的亲缘关系。

(2)热液运移和充填交代明显受控于断裂、裂隙的发育程度,断裂构造最为明显的地段往往构成矽卡岩的富集中心^[21]。本区钻孔资料显示,在断裂构造发育的地段,常形成块状矽卡岩,并且在大理岩和角岩裂隙中,常见矽卡岩矿物脉。因此,矿区的断裂构造和裂隙为热液的运移提供了通道条件。

(3)矽卡岩的空间分带特征能反映成矿流体演化、围岩成分、温度变化、氧化还原环境及形成深度^[22]。大多矽卡岩型铜矿床形成于强氧化性的侵入体与强还

原性的地层之间的接触带^[23],在矽卡岩体系中,Ca、Al、Ti、Mn 常富集于还原性强的环境中,而 Fe³⁺易于富集于氧化性较强的环境中^[24,25]。地表观察表明,在红牛矿区石英二长斑岩出露的位置东北向,矿体含较多的磁铁矿,甚至出现块状磁铁矿矿石。此外,该带具有粗粒褐色—褐红色富 Fe³⁺的钙铁榴石矽卡岩,表明出露岩体附近的矽卡岩氧化性较强。由于流体中 Mg 组分的活动性强于 Fe^[23],故流体可以携带更多的 Mg 到距岩体稍远的地层中发生接触交代反应,加之由岩体向两侧,温度降低,氧化性减弱,因此由富钙铁榴石矽卡岩过渡到富透辉石矽卡岩。钻孔中的矽卡岩及接触热变质岩的产生受控于沉积地层的岩性特征。红牛矿区原沉积岩为泥质岩与粉砂岩互层,夹大理岩,由于岩浆侵入的影响,使泥质岩和粉砂岩变质形成条带状黑云母角岩或黑云母角岩与透辉石长英角岩互层,并在靠近大理岩的地方形成矽卡岩。随着深度增加,更加靠近氧化性强的岩体,因此空间上石榴石矽卡岩逐渐增多,且颜色变深。综合分析水平方向与垂向矽卡岩分带,富钙铁榴石的矽卡岩更多的产于具氧化性岩体附近的矽卡岩带,辉石矽卡岩距岩体略远,特别是钙铁辉石矽卡岩,分布于还原性强的外矽卡岩带。在岩体和围岩间,距岩体稍远的矽卡岩带温度较低,矽卡岩的退化蚀变较强,且有利于含铜硫化物富集。垂向反应了地层的控岩控矿作用。由此看出,岩浆热液沿构造通道从深部脉动上升,在上升过程中充填交代围岩而形成矽卡岩及矿体。

5.2 矿床成因类型的确立

从矿床地质及地球化学特征来看,红牛矿床属典型的斑岩—矽卡岩型矿床,其依据有:

(1)矿体主要以稠密浸染状分布在大理岩顶、底面的矽卡岩化带中,以细脉浸染状分布在透辉石长英角岩中,铜矿化与矽卡岩及钙硅酸盐角岩在空间上重合,矿体产状和形态受矽卡岩和钙硅酸盐角岩产出形态的制约;

(2)矿床围岩蚀变具有典型矽卡岩型矿床的分带特征^[21,22,26-30]。在垂向上,由浅至深依次出现黑云母角岩→条带状黑云母角岩(含斑点角岩)→透辉石长英角岩→矽卡岩→大理岩;在平面上,以石英二长斑岩岩枝出露点北东为中心,向两侧存在典型矽卡岩型矿床的分带特征,即粗粒红褐色石榴子石矽卡岩→褐黄色中细粒(30~50 mm)石榴子石矽卡岩→

透辉石-石榴子石矽卡岩→硅灰石矽卡岩;

(3)金属元素在空间上也具有分带性:由石英二长斑岩岩枝出露点北东向围岩,矿化元素依次为:Mo、Cu→Cu、Fe、Ag→Pb、Zn;

(4)石英二长斑岩、矽卡岩和大理岩中的 Si、Ca 呈现明显的负相关特征(图 10),反映在矽卡岩化过程中石英二长斑岩类和大理岩经历了 Ca、Si 的物质交换。

(5)矿石元素相关分析表明(表 5),Cu 与 Ag、Zn、Fe 呈明显正相关,它们也都在矽卡岩化带富集,说明它们与矽卡岩化带的热液作用(双交代)有密切的联系^[3]。Cu、Ag、Zn、Fe 与 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 等明显呈负相关或无相关性,表明富 CaO 的大理岩和富 SiO₂、Al₂O₃ 的岩浆岩都不是有利的矿化岩体,它们必须经过较强的交代蚀变,发生 SiO₂、Al₂O₃ 与 CaO、MgO 的交换后才有可能成矿,而此恰与矽卡岩化带上的矿化作用相吻,表明矽卡岩化是有利的矿化作用。

(6)交代作用所形成岩石的 REE 组成是受原岩、流体成分及其物理化学环境所影响^[32]。通过对比代表性岩石的稀土元素配分曲线特征可以看出,矽卡岩化石英二长斑岩与原岩相比,轻稀土含量基本相当,但重稀土却有一定的富集。这一特点预示着与矽卡岩有成因联系的含矿热液可能是石英二长斑岩的残余熔浆进一步演化分异的产物。角岩受热液影响程度较小,其重稀土含量高于矽卡岩,是对原岩稀土元素组成的继承,而具“矽卡岩化”特征的角岩与普通角岩相比,其稀土总量和重稀土含量均明显降低,但仍高于矽卡岩稀土含量,这是由于“矽卡岩化”

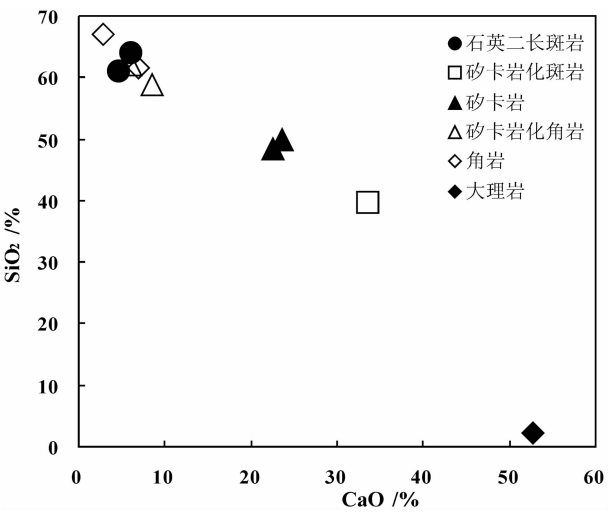


图 10 矿区岩石 SiO₂-CaO 关系图解
Fig.10 SiO₂-CaO correlation of main rocks in the Hongniu deposit

角岩,在一定程度上继承了角岩的稀土元素特征,但由于热液流体的交代,使角岩中的部分重稀土被带出。矽卡岩与大理岩相比,稀土元素总量逐渐增加,且轻、重稀土分馏程度逐渐增强,明显受大理岩和石英二长斑岩稀土元素组成的共同影响。因此,从各类岩石稀土元素特征来看,矽卡岩与大理岩、石英二长斑岩具有密切的成因关系。

5.3 找矿方向

红牛矿区角岩广泛发育,并在角岩中形成了工业矿体。角岩的空间分布往往与岩浆岩有关,成因上是由于岩浆在侵入过程中(尤其是在岩浆侵位到最终阶段)向围岩释放热量而形成的热接触变质岩,其

表 5 红牛矿床矿石元素相关矩阵
Table 5 Correlation matrix of ore elements in the Hongniu deposit

	Cu	Ag	Zn	Mo	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Cu	1.00								
Ag	0.93	1.00							
Zn	0.93	0.84	1.00						
Mo	-0.22	-0.25	-0.13	1.00					
Fe	0.62	0.48	0.60	0.28	1.00				
SiO ₂	-0.30	-0.38	-0.22	-0.21	-0.02	1.00			
Al ₂ O ₃	-0.52	-0.62	-0.41	0.07	-0.22	0.89	1.00		
CaO	0.32	0.39	0.25	0.36	0.21	-0.97	-0.88	1.00	
MgO	-0.11	-0.34	-0.14	0.25	0.39	0.58	0.60	-0.49	1.00

空间分布上一般是围绕隐伏岩体呈“面”型分布的(王登红等,2011)。红牛矿区及其外围大规模的角岩化,预示了深部可能存在隐伏的岩浆岩体。目前,矿区仅在北东部外围出露与成矿有关的石英二长斑岩岩枝,要形成红牛矿区及外围如此规模的矽卡岩型铜矿床,深部可能存在较大的隐伏岩体。其次,从矽卡岩和金属矿物分布特征来看,石英二长斑岩出露点北东方向发育磁铁矿、辉钼矿以及粗粒深褐色的钙铁榴石,具有近岩体矽卡岩带(Meinert et al., 2003; 2005)特征。目前,红牛矿床钻孔布置集中于矿区中南部,忽视了石英二长斑岩岩枝的重要性。因此,建议进一步找矿工作应重视石英二长斑岩出露点附近。目前,该矿床正处于地质研究初期,进一步勘查工作正在积极展开,希望本次研究能为深部找矿以及寻找含矿岩体提供依据。

致谢:感谢云南黄金矿业集团股份有限公司对野外工作的支持,感谢毛景文研究员在野外及室内研究过程中的细心指导!

参考文献(References):

[1] 曲晓明, 杨岳清, 李佑国. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因[J]. 矿床地质, 2004, 23(4):431-442.
Qu Xiaoming, Yang Qiuqing, Li Youguo. A discussion on origin of Yangla copper deposit in light of diversity of ore-hosting rock types [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(4):431-442(in Chinese with English abstract).

[2] 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 等. 滇西北红山晚白奎世花岗斑岩型成矿系统及其大地构造学意义 [J]. 地质学报, 2006, 80 (9):1422-1433.
Xu Xing wang, Cai Xinpin, Qu Wenjun, et al. Later Cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralizationsystem in the Hongshan area, northwestern Yunnan and its significances for tectonics[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9):1422-1433(in Chinese with English abstract).

[3] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征——以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例 [J]. 矿物学报 2007, 27(1):415-426.
Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, et al. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007. 27(1):415-426(in Chinese with English abstract).

[4] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石离子探针 U-Pb 年龄: 成矿时限及地质意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2313-2321.
Wang Shouxu, Zang Xingchun, Leng Chengbiao, et al. Zircon

SHRIMP U-Pb dating of the Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China; The ore-forming time limitation and geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2313-2321(in Chinese with English abstract).

[5] 李文昌, 尹光候, 刘学龙, 等. 中甸矿集区普朗-红山铜多金属成矿亚带北段帕纳牛场斑岩体 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及铋矿化[J]. 地质与勘探, 2010, 46(2):267-279.
Li Wenchang, Yin Guanghou, Liu Xuelong, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages and antimony mineralization of the Pananniuchang porphyry in the Zhongdian area of Yunnan Province [J]. Geology and Prospecting, 2010, 46(2):267-279(in Chinese with English abstract).

[6] 苟体忠, 钟宏, 冷成彪, 等. 云南中甸地区烂泥塘低温热液型 Cu-Au 矿床铂族元素 (PGE) 地球化学特征 [J]. 矿物学报, 2010, 30 (3):320-335.
Gou Tizhong, Zong Hong, Leng Chengbiao, et al. Geochemistry of Platinum-Group Elements of the Lannitang epithermal Cu-Au Deposit in the Zhongdian Region, Yunnan Province, SW China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30 (3):320-335 (in Chinese with English abstract).

[7] Reid A J, Wilson C J L, Shun L. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibet an Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 2005. 27, 119-137.

[8] Sengor A M C. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[C]// Yin A, Harris (eds). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge, 1996:486-640.

[9] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan Tibet an orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28:211-280.

[10] Roger F, Arnaud N, Gilder S, et al. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in East Central Tibet[J].Tectonics 2003, 22:1037-1057.

[11] Sengor A M C. The cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia [J]. Special Paper-Geological Society of America, 1984, 195, 1-82.

[12] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. “三江”特提斯火山作用与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1993:58-64.
Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, et al. Sangjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:58-64(in Chinese).

[13] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2):121-138.
Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, et al. Volcanic petroectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7 (2):121-138 (in Chinese with English abstract).

[14] 李文昌, 莫宣学. 西南“三江”地区新生代构造及其成矿作用[J]. 云南地质, 2001, 20(4):333-346.
Li Wenchang, Mo Xuanxue. The Cenozoic tectonics and metallogensis in the “three-river” area of southwest China [J].

- Yunnan Geology, 2001, 20 (4):333–346 (in Chinese with English abstract).
- [15] 曾普胜, 莫宣学, 喻学忠, 等. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 2003, 22(4):393–400.
- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuezhong, et al. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan [J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4):393–400 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 2002, 23(1):17–24.
- Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, et al. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23 (1):17–24 (in Chinese with English abstract).
- [20] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, South-eastern Australia[J]. Petrol. 1997, 38(3), 371–391.
- [21] Meinert L D, Hedenquist J W, Satoh H. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu–Au ore deposits by magmatic fluids[J]. Economic Geology, 2003, 98:147–156.
- [22] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits[J]. Economic Geology, 2005, 100:299–336.
- [23] Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. Skarn deposits[J]. Economic Geology, 1981, 75:317–391.
- [24] Nicolescu S, Cornell D H, Sodervall U. Secondary ion mass spectrometry analysis of rare earth elements in grandite garnet and other skarn related silicates [J]. European Journal of Mineralogy, 1998, 10:251–259.
- [25] Ochiai K, Tagiri M, Tanaka H. Behavior of the rare earth elements during the skarn formation at the Kamaishi mine, Japan [J]. Resource Geology, 1993, 43:291–300.
- [26] Meinert L D. Origins of skarn: regional metamorphism and metasomatism, contact effects related to plutons, and metamorphism of pre-existing ore deposits [J]. IXIAGOD Symposium, Abstracts, 1994, 1:313–314.
- [27] Meinert L D. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration [J]. Exploration and Mining Geology, 1997, 6: 185–208.
- [28] 毛景文, 李红艳, B Guy, 等. 湖南柿竹园矽卡岩–云英岩型 W–Sn–Mo–Bi 矿床地质和成矿作用[J]. 矿床地质, 1996, 15(1):2–9.
- Mao Jinwen, Li Hongyan, B Guy, et al. Geology and Metallogeny of the Shizhuyuan Skarn–Greisen W–Sn–Mo–Bi Deposit, Huanan Province [J]. Mineral Deposits, 1996, 15 (1):2–9 (in Chinese with English abstract).
- [29] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2):109–119.
- Mao Jinwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing, et al. Mineral deposit model for porphyry–skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle–Lower Yangtze Valley metallogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (2):109–119 (in Chinese with English abstract).
- [30] 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 2010, 31(4):1–12.
- Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, et al. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper – Polymetallic Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31 (4):1–12 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈衍景, 郭抗衡. 河南银家沟矽卡岩型金矿的地质地球化学特征及其成因[J]. 矿床地质, 1993, 12(3):265–272.
- Cheng Yanjing, Guo Kangheng. Geology, Geochemistry and genesis of the Yinjiagou skarn type gold deposit, Henan Province [J]. Mineral Deposits, 1993, 12 (3):265–272 (in Chinese with English abstract).
- [32] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承恩. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社, 2012.
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengen. China Skarn Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012 (in Chinese).
- [33] 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等. 西藏甲玛矿区角闪岩特征及其对深部找矿的意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7):2103–2108.
- Wang Denghong, Tang Juxing, Ying Lijuan, et al. Hornfels feature in the Jiama ore deposit, Tibet and its significance on deep prospecting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7):2103–2108 (in Chinese with English abstract).

Geological and geochemical characteristics of the Hongniu copper deposit in Zhongdian area, northeastern Yunnan Province

PENG Hui-juan¹, ZHANG Chang-qing¹, ZHOU Yun-man²,

TIAN Guang³, Li Jian-xing², LUO Yue-zhong², REN Jun-sheng², LONG Fei²

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Yunnan Gold Mining Industry Group, Kunming 650000, Yunnan, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: The Hongniu deposit is located in the Zhongdian island arc belt of northwest Yunnan and lies in the middle part of southwest Sanjiang region, belonging to the southern segment of the Triassic Yidun island arc belt. This ore deposit is one of the promising copper-polymetallic deposits with vast potential, and its Cu reserves have reached the middle size. Geological features of the ore bodies and element geochemical characteristics indicate that Hongniu is a typical skarn-hornfels type copper polymetallic ore deposit. It has typical alteration zoning and metallogenic element zoning of the skarn type deposit in both vertical and horizontal directions. The element geochemical characteristics of the skarn are obviously affected by the elements of marble and quartz monzonite porphyry. According to geological features of the ore bodies, the authors also infer that the deep porphyry bodies have great metallogenic potential.

Key words: skarn type; hornfels type; geological feature; Hongniu; Yunnan, Zhongdian

About the first author: PENG Hui-juan, female, born in 1985, doctor candidate, majors in the study of mineral deposits; E-mail: 54980845@qq.com.