

藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型

陈建平^{1,2)}, 唐菊兴^{3,4)}, 丛源^{1,2)}, 董庆吉^{1,2)}, 郝金华^{1,2)}

1) 中国地质大学国土资源与高新技术研究中心, 北京, 100083;

2) 中国地质大学北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京, 100083;

3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

4) 成都理工大学, 成都, 610059

内容提要: 西藏玉龙斑岩铜矿是世界级超大型铜矿, 从其发现开始迄今, 众多学者对其展开了深入研究, 积累了大量的资料。随着玉龙铜矿开发进入全面实质性阶段, 迫切地需要对玉龙铜矿的研究成果进行系统的归纳总结, 分析成矿地质特征以及成矿模式, 以便指明玉龙铜矿的找矿方向, 达到增加储量满足后续开发的需求。笔者利用 Micromine 软件建立了主要矿体的三维立体模型, 分析了矿体以及矿石类型三维空间分布规律。通过总结常量元素、微量元素、稀土元素以及流体包裹体地球化学特征, 分析同位素测年, 厘定矿床成矿时代, 建立出玉龙斑岩铜矿成矿模式。该模式的建立对于玉龙斑岩铜矿乃至三江地区斑岩铜矿床找矿突破和潜力评价具有重要的指导意义和应用价值。

关键词: 斑岩铜矿; 地质特征; 成矿模型; 玉龙

玉龙铜矿是我国三江地区的一个世界级特大型斑岩铜矿床, 它所属的玉龙斑岩铜(钼)矿带是我国重要的铜矿成矿远景区带、铜资源最为丰富的地区之一, 同时玉龙斑岩铜(钼)矿带也是世界上三大主要斑岩铜矿带之一的特提斯-喜马拉雅成矿带的一个组成部分(陈建平等, 1997)。玉龙斑岩铜钼矿带位于特提斯-喜马拉雅构造域东部三江构造带的中部, 构造线由近东西向急转为近南北向的转折部位, 大地构造位置独特。矿带所处的构造单元是夹持在扬子陆块与印度板块之间的羌塘-昌都中间地块, 东邻义敦岛弧带, 西连怒江结合带(唐仁鲤等, 1995)。

从1966年西藏第一地质大队首度发现玉龙矿床至今, 该地区开展了不同程度的地质工作, 在找矿勘查方面取得了较大的突破, 先后在玉龙斑岩铜(钼)成矿带内发现了莽总、扎那、多霞松多、馬拉松多、马牧普等代表性的斑岩铜钼矿床(点)。迄今为止, 在玉龙铜矿的矿床地质特征(芮宗瑶, 1984; 唐仁鲤等, 1995)、花岗岩类与成矿的关系(马鸿文, 1989, 1990; 姚鹏等, 1991; 侯增谦等, 2003)、含矿斑岩地球

化学特征及成因(张玉泉等, 1998a, 1998b; 姜耀辉等, 2006; 陈文明等, 2006)、蚀变与成矿的关系(周宜吉, 1980, 1985, 1986)、流体包裹体特征(李萌清等, 1981; 李萌清, 1984, 1985; 谢玉玲等, 2006)、围岩与斑岩铜矿的关系(陈文明, 1980, 1984; 陈建平等, 1997)、区域构造与成矿(唐仁鲤等, 1995; Hou et al., 2003)、成岩成矿年龄(曾普胜等, 2006)、斑岩型铜矿的成矿构造背景(芮宗瑶, 1984; 唐仁鲤等, 1995; 张洪涛等, 2004)、玉龙斑岩铜(钼)矿的成矿体系(王成善等, 1996^①; 唐菊兴等, 2004, 2006)和次生富集成矿作用(唐仁鲤等, 1995; 王成善等, 1996^①; 陈建平等, 1998; 胡明铭等, 1998; 唐菊兴等, 2004; 顾雪祥等, 2004)等方面做了大量的研究工作。

2007年由西藏玉龙铜业股份有限公司组织四川四〇三地质队和西藏第六地质大队对矿床进行了补充勘探工作, 取得了大量新的地质资料与数据。随着玉龙铜矿进入全面实质性实施开发阶段, 迫切需要对玉龙铜矿的研究成果进行系统的归纳总结, 分析成矿地质特征以及成矿模式, 以便指明玉龙铜

注: 本文为“三江北段地学信息提取与成矿预测”项目和“玉龙铜矿 I、II、V 号矿体地质特征及其外围成矿规律和成矿预测研究”项目资助成果。

收稿日期: 2009-10-20; 改回日期: 2009-11-02; 责任编辑: 周健。

作者简介: 陈建平, 男, 1959年生。教授, 博士生导师, 地球探测与信息技术专业, 主要从事矿产资源预测与评价研究。Email: 3s@cugb.edu.cn。

矿的找矿方向。本次研究在系统总结前人矿床地质特征、矿床地球化学、矿床成矿模式的研究成果基础上,利用 Micromine 软件建立了主要矿体的三维立体模型,并厘定了主要矿石类型的三维空间分布规律。为矿区开发以及深部部勘查工作提供参考。

1 矿床地质

玉龙斑岩体侵位于甘龙拉背斜的南端转折端,其直接围岩为 T_{3j} 砂岩、泥岩, T_{3b} 碳酸盐岩、碎屑岩。岩体空间形态呈“蘑菇”状,在地表展布形态为“梨

形”,其长轴为近南北向,已控制长约 1.6 km,短轴为近东西向,宽约 0.9 km,面积约 0.85 km²(图 1)。

1.1 矿体产出特征

根据斑岩铜矿的成矿规律及蚀变带分布特征,结合矿区最新的钻孔编录成果,在 Micromine 软件平台上建立了玉龙斑岩铜矿床主要矿体三维实体模型。其中, I 号矿体主要位于斑岩体中,将 I 号矿体细分为 3 个矿层(图 2): I-3 矿层分布于斑岩体上部的硅化粘土化带(SiKa)内,为 I 号矿体主要的赋矿层。 I-2 矿层分布于斑岩体中部的绢云英化带

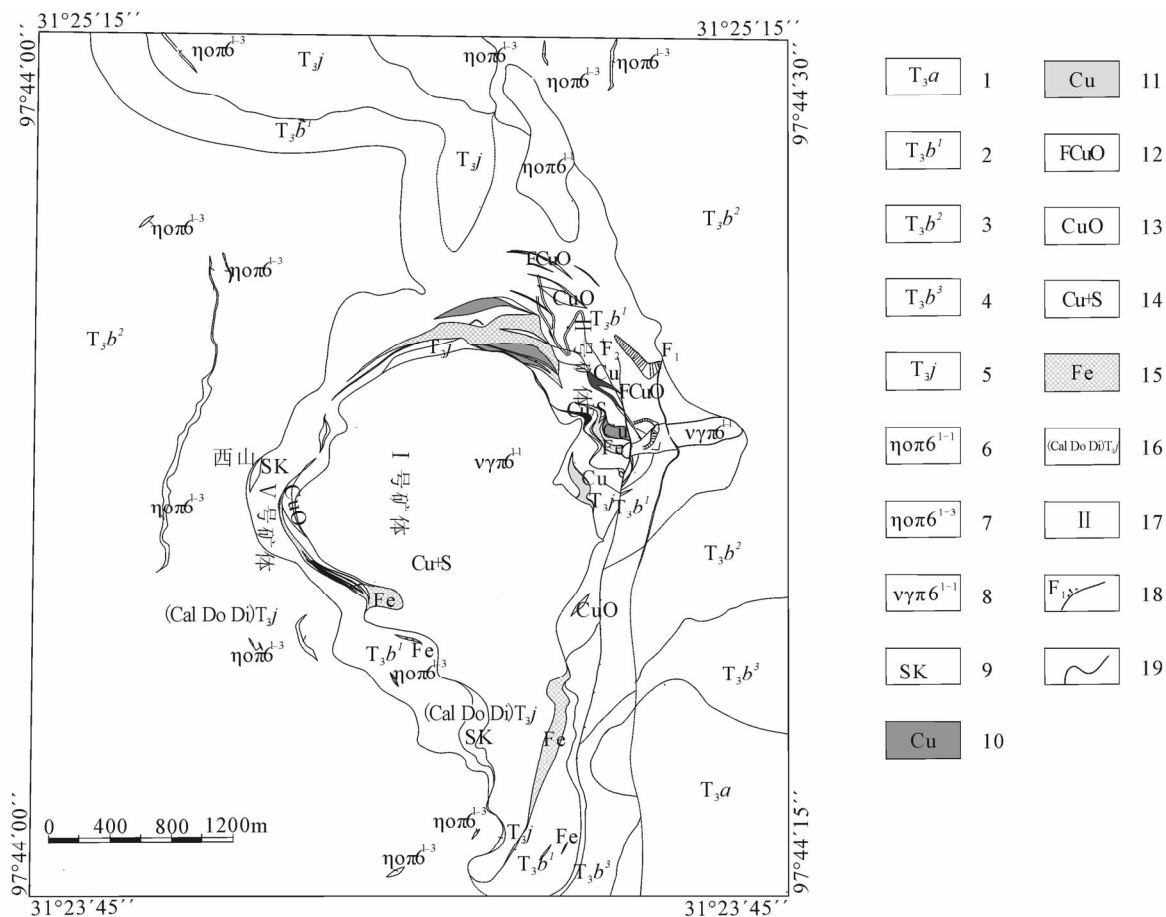


图 1 玉龙斑岩铜矿床矿区地质简图

Fig. 1 The sketch geological map of the Yulong porphyry Cu deposit

1—上三叠统阿堵拉组;2—上三叠统波里拉组下段;3—上三叠统波里拉组中段;4—上三叠统波里拉组上段;5—上三叠统甲丕拉组;6—纳长或石英纳长斑岩;7—喜马拉雅早期第一次侵入体石英二长斑岩;8—喜马拉雅早期第一次侵入体二长花岗斑岩;9—砂卡岩;10—低品位氧化铜矿;11—角岩型铜矿;12—富氧化铜矿;13—氧化铜矿;14—铜硫矿;15—含铜铁矿;16—方解石白云石透灰石角岩;17—矿体编号;18—实测及推测张性断层及编号;19—实测及推测地质界线

1—Adula Formation of Upper Triassic;2—lower part of Bolilia Formation of Upper Triassic;3—middle part of Bolilia Formation of Upper Triassic;4—upper part of Bolilia Formation of Upper Triassic;5—Jiapila Formation of Upper Triassic;6—albite or quartz albite porphyry;7—Himalayan quartz monzonitic porphyry;8—Himalayan monzonitic granite-porphyry;9—skarn;10—lower content oxide copper ore; 11—copper ore of hornfels type;12—oxide copper-rich ore;13—oxide copper ore;14—Cu+S ore;15—copper-bearing iron ore;16—hornfels of calcite and dolomite and diopside;17—ore body number;18—monitoring and measuring tensional faults and numbers;19—monitoring and measuring geological boundary

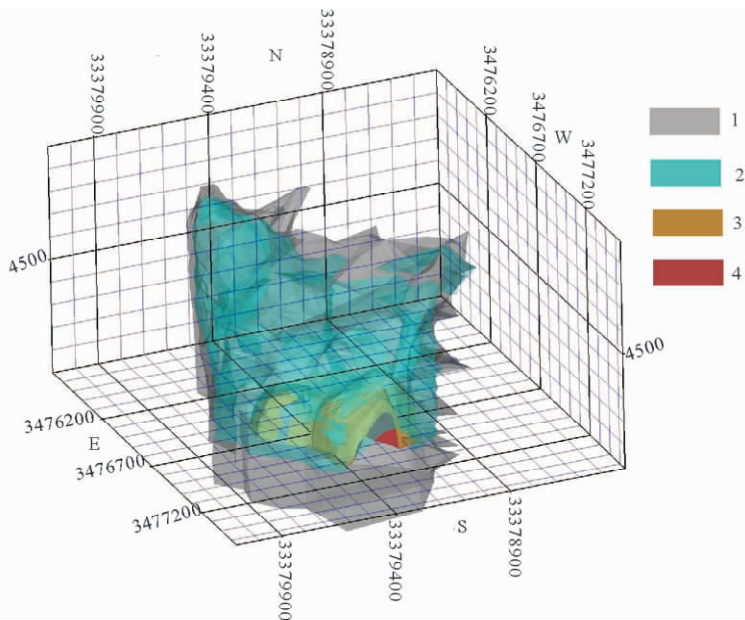


图 2 玉龙斑岩铜矿 I 号矿体三维模型图

Fig. 2 The three dimensional stereomodel of the No. I ore body in Yulong porphyry Cu deposit

1—斑岩体;2—I-1 矿层;3—I-2 矿层;4—I-3 矿层

1—Porphyry;2—I-1 ore-controlling;3—I-2 ore-controlling;4—I-3 ore-controlling

(SeSi)内, I-3 矿体下部, I-1 矿体上部。I-1 矿层分布于斑岩体中下部的钾硅化带(KSi)内。

II 号矿体产出于玉龙斑岩体周围的矽卡岩带中,矿体多赋存于波里拉组中、下段与上三叠统甲丕拉组的接触带之中,该矿体呈“鞍状”产出(图 3)。

V 矿体与 II 号矿体产出一致,均产于玉龙含矿斑岩体周围的矽卡岩带中,矿体主要赋存于斑岩与围岩外接触带的三叠系上统甲丕拉组和三叠系上统波里拉组下段之间。在横向和纵向上均呈叠瓦状、波状起伏(图 4)。

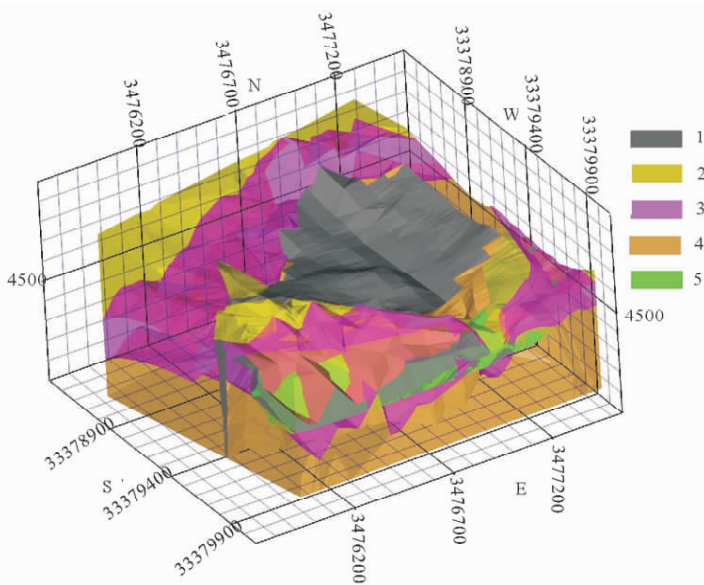


图 3 玉龙斑岩铜矿 II 号矿体三维模型图

Fig. 3 The three dimensional stereomodel of the No. II ore body in Yulong porphyry Cu deposit

1—斑岩体;2—波里拉组中段;3—波里拉组下段;4—甲丕拉组;5—II 号矿体

1—Porphyry;2—middle part of Bolilia Formation;3—lower part of Bolilia Formation;4—Jipila Formation;5—No. II ore body

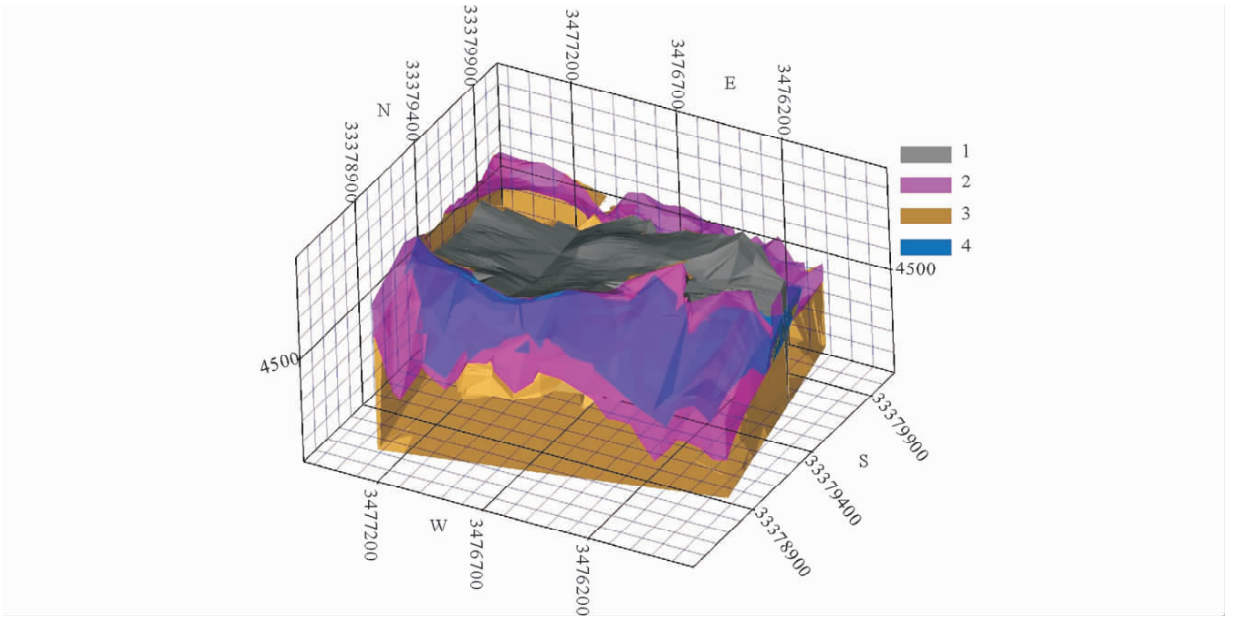


图 4 玉龙斑岩铜矿 V 号矿体三维模型图

Fig. 4 The three dimensional stereomodel of the No. V ore body in Yulong porphyry Cu deposit

1—斑岩体;2—波里拉组下段;3—甲丕拉组;4—V 号矿体

1—Porphyry;2—lower part of Bolilia Formation;3—Jipila Formation;4—No. V ore body

1.2 矿石类型分布特征

玉龙矿床内各种矿化体的矿石类型比较复杂,产出的状态和形成作用各异,矿物组合迥然不同。矿石类型依据自然产出状态、含矿金属种类、结构和构造特点分为:细脉浸染状矿石、块状磁铁矿、硫化

矿石、肾状、皮壳状氧化矿石、细脉浸染状矿石、土状、粉末状氧化矿石、块状、蜂窝状褐铁矿型矿石、块状铜铁矿型矿石、块状赤铜矿型矿石、土状硫化物矿石、块状黄铁矿型硫化物矿石、块状矿石、细脉浸染状角岩型硫化矿石、角砾状矿石。经过 2009 年玉龙

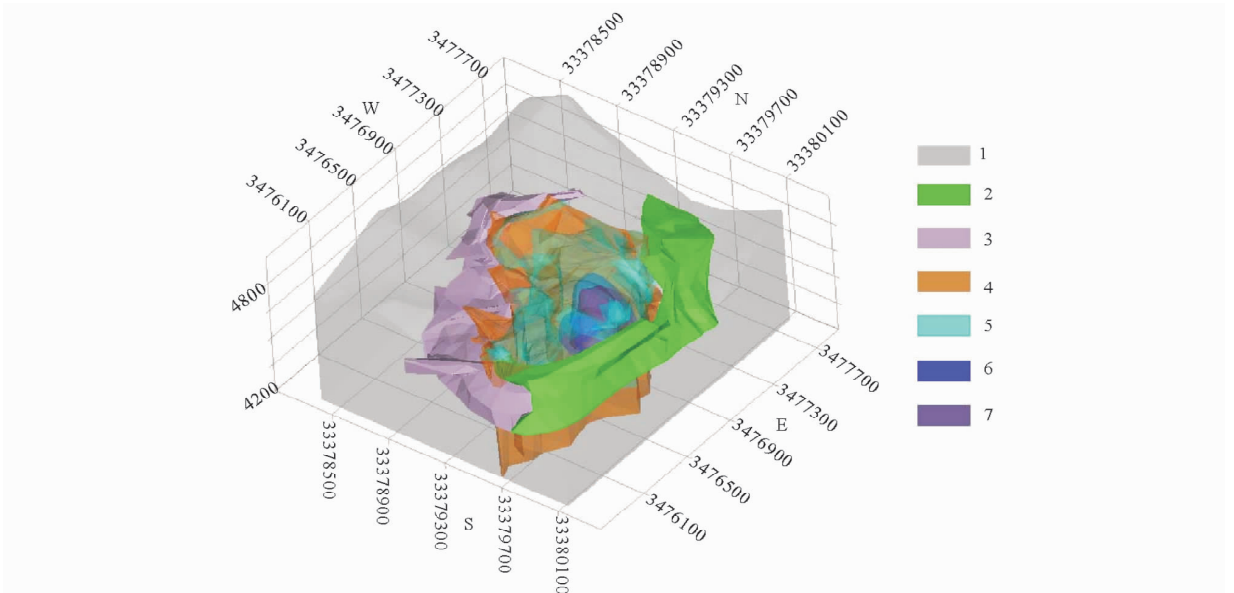


图 5 玉龙斑岩铜矿 I 号矿体矿石类型空间分布图

Fig. 5 The spatial distribution of ore types of the No. I ore body in Yulong porphyry Cu deposit

1—围岩;2—II 号矿体;3—V 号矿体;4—斑岩体;5—脉状矿石;6—细脉浸染状矿石;7—浸染状矿石;

1—Wall rock;2—No. II ore body;3—No. V ore body;4—porphyry;5—vein ore;6—veinlet-dissemination ore;7—dissemination ore

铜矿的补充勘探,探明 I 号矿体向南侧伏,矿体可分为 3 个矿层,矿石类型从浅部至深部依次为:脉状矿石(I-3)→细脉浸染状矿石(I-2)→浸染状矿石(I-1)(图 5),矿石矿物主要为黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿等,次为辉铜矿、赤铜矿,由于近地表氧化淋滤作用,局部可见孔雀石、蓝铜矿等表生铜矿物。

1.3 矿石矿物特征

黄铜矿:一般呈他形粒状,内部裂纹较发育,被斑铜矿、铜蓝交代现象普遍(图版 I-1),构成网状结构(图版 I-2)、“孤岛”、“碎片”残余结构(图版 I-3);有的颗粒被蓝辉铜矿沿周边交代呈反应边结构(图版 I-4);有的呈自形一半自形晶分布于脉石矿物中(图版 I-5),其中可看见黄铜矿的四方偏三角面体;有的呈他形粒状均匀分布于脉石矿物中构成稠密浸染状(图版 I-6);有的呈他形晶粗粒状集合体,产于闪锌矿中(图版 I-7);有的产于磁铁矿和赤铁矿中(图版 I-8)。

黄铁矿:内部裂纹发育,有的颗粒见压碎现象(图版 II-1),黄铁矿集合体呈脉状产出(图版 II-2),大小脉体近于平行。有的呈自形晶、半自形晶、他形晶,星散分布于脉石矿物中,有的镶嵌于黄铜矿中(图版 II-3)。

蓝辉铜矿:产出状态有:①他形粒状集合体呈脉状分布于脉石矿物中(图版 II-4);②在黄铜矿周边交代构成反应边结构(图版 I-4)。

铜蓝:主要呈片状、不规则状分布于斑铜矿中(图版 II-5)。与斑铜矿关系密切。是表生条件下次生产物。

辉钼矿:呈板状、片状集合体,局部氧化,见有交代黄铜矿的现象(图版 II-6、7,图版 III-6)。

斑铜矿:主要见交代黄铜矿而成伴生关系,沿黄铜矿内部裂纹交代呈网状结构、“孤岛”“碎片”状残余结构(图版 II-8);沿黄铜矿边缘交代呈反应边和细针状(图版 II-5)。

赤铜矿:镜下为灰白带蓝色,产出状态有:呈他形粒状连晶结构和结状结构(图版 III-1、7);个别呈半自形晶;有的呈细脉分布于岩石裂隙中,呈针状、片状、纤维状集合体分布于岩石裂隙中(图版 III-2、3)。值得关注的是赤铜矿与自然铜关系十分密切,常伴生在一起形成各种矿石组构如脉状构造(图版 III-3)、填隙交代结构(图版 III-4)、反应边结构、残余孤岛结构(图版 III-3)、浸蚀结构(图版 III-5)等,从组构的特征来看,自然铜先于赤铜矿形成,均是氧化带的产物。

黝铜矿:与黄铜矿连生(图版 I-5),呈等粒状或半自形晶分布于脉石矿物中。

辉铜矿:辉铜矿呈他形粒状分布于脉石矿物中(图版 III-8)。

2 矿床地球化学

2.1 常量元素特征

玉龙斑岩岩体主要氧化物含量(表 1)同世界花岗岩平均化学成分相比,平均值接近世界花岗岩的平均化学成分。成分差异表现在:SiO₂含量偏低。碱质含量,特别是 K₂O 含量偏高。

表 1 玉龙斑岩铜矿岩石化学成分(%)

Table 1 Chemical compositions of rocks from the Yulong porphyry copper deposit(%)

样品编号	样品名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
P1-21	二长花岗斑岩	63.42	0.34	17.45	2.54	0.08	0.79	3.24	3.71	4.4	0.29
P1-24	二长花岗斑岩	67.47	0.33	15.69	2.32	0.02	0.54	2.35	3.3	4.88	0.06
ZK1808-42	泥化矿化斑岩	63.72	0.35	17.51	2.45	0.08	0.83	3.29	3.77	4.45	0.29
ZK59-19	泥化矿化斑岩	66.4	0.38	13.18	2.71	0.059	0.62	0.49	1.61	6.97	0.19

2.2 稀土元素特征

本区各种岩石和矿石均有轻稀土元素富集的特点(表 2),稀土配分模式呈平缓的右倾型(图 6);其中二长花岗斑岩稀土总量为 $209.88 \times 10^{-6} \sim 400.88 \times 10^{-6}$,平均值为 292.95×10^{-6} 。矿化蚀变花岗斑岩稀土总量为 $16.37 \times 10^{-6} \sim 246.18 \times 10^{-6}$,平均值为 90.08×10^{-6} ,说明花岗斑岩遭受矿化、蚀变时的溶液为强酸性、低盐度溶液(黄朋,2002)。具弱 Eu 和 Ce 异常。矿石的稀土元素总量为 $11.38 \times 10^{-6} \sim 47.59 \times 10^{-6}$,平均值为 $29.63 \times$

10^{-6} 。(La / Yb)_N 比值均大于 1,其中花岗斑岩的该比值最大为 24.56,矿化蚀变花岗斑岩的该比值介于两者之间,为 13.56,矿石的该比值最小为 6.03。HREE 的极度亏损以及轻重稀土的强烈分异,说明源区岩浆残留相中存有石榴子石或普通角闪石(孟祥金,2004),强烈的富集轻稀土、弱的 Eu 异常和 Ce 异常的特征。

2.3 微量元素特征

本区花岗斑岩的微量元素含量(表 3)特点表明:花岗斑岩中的 Mo、Cu、Au、Ag、Th、U 等微量元

表2 玉龙斑岩铜矿稀土元素分析结果及相关计算参数($\times 10^{-6}$)Table 2 Calculated parameter and analyses results of REE ($\times 10^{-6}$) from the Yulong porphyry copper deposit

样品编号	样品名称	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	LREE /HREE	Σ REE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
96P1-14	二长花岗斑岩	48.33	91.45	34.90	6.78	1.31	0.73	2.40	0.33	11.29	209.88	13.43	0.77	0.93
96P1-16	二长花岗斑岩	45.67	103.66	42.24	7.54	1.23	0.46	1.21	0.17	19.52	222.92	25.16	0.77	1.01
96P1-21	二长花岗斑岩	65.99	168.44	60.98	10.38	1.48	0.44	1.84	0.21	25.91	338.12	23.91	0.75	1.09
96P1-24	二长花岗斑岩	83.36	193.10	71.77	13.71	1.76	0.73	1.61	0.16	24.01	400.88	34.52	0.67	1.04
ZK1808-28	含石英硫化物脉石英	8.20	13.72	10.99	3.35	0.64	0.71	2.08	0.30	2.62	53.67	36.04	0.64	0.74
ZK1808-34	砂卡岩化斑岩	4.62	1.22	4.67	1.28	0.25	0.22	0.28	0.22	3.29	16.37	2.63	0.69	0.17
ZK1808-38	泥化斑岩	46.98	112.47	54.07	7.55	1.24	0.43	1.13	0.12	22.92	246.18	11.00	0.78	1.00
ZK1808-42	泥化矿化斑岩	38.88	102.59	57.25	11.47	1.94	0.77	2.03	0.31	12.5	243.26	27.72	0.77	1.02
ZK32-12	泥化、黄铁矿化斑岩脉	3.20	5.38	3.67	0.91	0.15	0.23	0.60	0.11	3.11	18.55	12.77	0.53	0.78
ZK51-3	泥化斑岩	3.25	6.13	5.58	2.19	0.71	0.48	1.76	0.27	1.61	30.18	3.56	0.95	0.76
ZK51-6	泥化斑岩	2.66	5.88	3.95	1.37	0.33	0.34	1.11	0.18	2	22.36	1.23	0.73	0.89
ZK32-1	块状褐铁矿铜矿石	7.94	11.8	8.43	2.73	0.97	0.61	2.01	0.34	2.33	47.59	2.63	1.02	0.72
ZK32-5	蓝灰褐红色褐铁矿矿石	4.09	6.25	3.33	1.01	0.29	0.21	0.79	0.13	3.12	20.72	3.45	0.88	0.78
ZK32-8	黄铁矿化粘土矿石	1.99	3.25	2.66	0.78	0.13	0.11	0.21	0.03	4.45	11.38	6.32	0.64	0.73
ZK32-9	含黄铁矿化孔雀石氧化矿石	6.22	9.3	11.27	1.42	0.37	0.22	0.58	0.09	6.34	35.15	7.15	0.88	0.62
ZK36-4	孔雀石化块状褐铁矿矿石	27.99	46.17	68.64	14.8	0.74	0.33	1.2	0.21	20.27	177.03	15.55	0.41	0.61
ZK36-6	块状黄铁矿黄铜矿矿石	6.71	7.34	8.9	2.61	0.95	0.56	0.97	0.19	2.47	38.87	4.61	1.05	0.53
ZK36-7	浸染状黄铁矿黄铜矿矿石	3.87	1.93	5.87	2.39	0.67	0.41	1.02	0.15	1.71	24.11	2.53	0.91	0.26

表3 玉龙斑岩铜矿岩石微量元素组成

Table 3 Composition of trace element of rocks from the Yulong porphyry copper deposit

样品编号	样品名称	Fe	Na	K	Ca	Tl	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr
96P1-14	二长花岗斑岩	0.81	0.66	7.30	0.17	0.6	11.06	23	3.4	<6	6200	201	366	259
96P1-16	二长花岗斑岩	1.41	1.9347	5.60	-0.92	0.6	4.8	15	3.2	68	2200	342	254	305
96P1-21	二长花岗斑岩	1.8	3.16	2.55	1.55	0.5	4.78	22	9.1	<6	14600	288	173	852
96P1-24	二长花岗斑岩	1.62	2.91	3.32	2.12	<0.5	4.75	19	2.5	67	4100	221	189	739
ZK1808-28	含石英硫化物脉石英	11.35	0.02	0.48	0.09	<0.5	13.55	37	24.2	54	11000	495	49	80
ZK1808-34	砂卡岩化斑岩	24.17	0.02	0.11	<0.01	0.7	0.44	9	145.2	108	7700	601	18	<40
ZK1808-38	泥化斑岩	1.72	2.59	2.54	2.96	1.3	6.42	33	7.4	47	1100	318	138	292
ZK1808-42	泥化矿化斑岩	3.37	0.72	1.36	11.38	-	5.01	22	78	154	104300	501	98	<40
ZK32-12	泥化、黄铁矿化斑岩脉	9.01	0.04	0.11	0.77	-	5.76	36	5.6	70	10100	620	112	<40
ZK51-3	泥化斑岩	11.02	0.04	0.04	0.06	-	8.87	20	18.3	52	10500	5495	7	<40
ZK51-6	泥化斑岩	15.18	0.04	0.05	0.2	-	9.12	36	46.3	47	11100	10.09%	15	<40

样品编号	样品名称	Cs	Ta	As	Zr	Mo	Ag	Ba	Hf	W	Au	Th	U
96P1-14	二长花岗斑岩	16.3	0.51	81.4	113	27.6	7.2	1408	6.6	20.4	30.8	16.8	14.32
96P1-16	二长花岗斑岩	10.1	0.91	90.1	118	7.1	12.9	493	12	13	37.3	36.51	5.57
96P1-21	二长花岗斑岩	5.2	1.22	48.8	141	<0.7	5.5	752	10.9	12.1	46.5	28.58	2.57
96P1-24	二长花岗斑岩	7.6	1.08	24.3	146	5.1	5.6	1209	8.4	18.9	<0.1	22.26	1.84
ZK1808-28	含石英硫化物脉石英	3.9	0.77	206.2	51	<0.7	13.8	116	2.6	253.8	97.5	5.18	0.39
ZK1808-34	砂卡岩化斑岩	1.1	0.25	250.1	84	10.1	18.2	<50	0.3	105.8	97.3	1.15	1.4
ZK1808-38	泥化斑岩	18.4	0.08	41.8	108	<0.7	2.1	773	5.7	2.5	36.2	18.67	3.72
ZK1808-42	泥化矿化斑岩	9.5		30.8	96	2.3	8.3	444	4.8	64.7	51.4	15.77	4.94
ZK32-12	泥化、黄铁矿化斑岩脉	234.4	0.4	350	<10	3.2	<0.1	121	1.9	264	135	3.14	4.51
ZK51-3	泥化斑岩	3.8	0.21	111	<10	4.9	23	214	1	27	12.1	2.8	26.8
ZK51-6	泥化斑岩	76.6	0.12	122	<10	3.5	<0.1	100	1.7	70	0.5	5.51	15.3

注:Ca、Na、K、Fe、Tl 含量单位为%,其余元素含量单位为 $\times 10^{-6}$ 。由成都理工大学中子活化分析室测定。

素均高于花岗岩克拉克值,其余微量元素与花岗岩克拉克值相近。各种岩石的微量元素含量具有一致性,显示它们具有相同的来源和成因特征。花岗斑

岩中 Ti 的亏损可能说明了源区有金红石矿物相的残留,Ta 的亏损与 Zr、Hf 的富集表明源区残留相中可能有角闪石的存在。Yb 的亏损则意味着岩浆

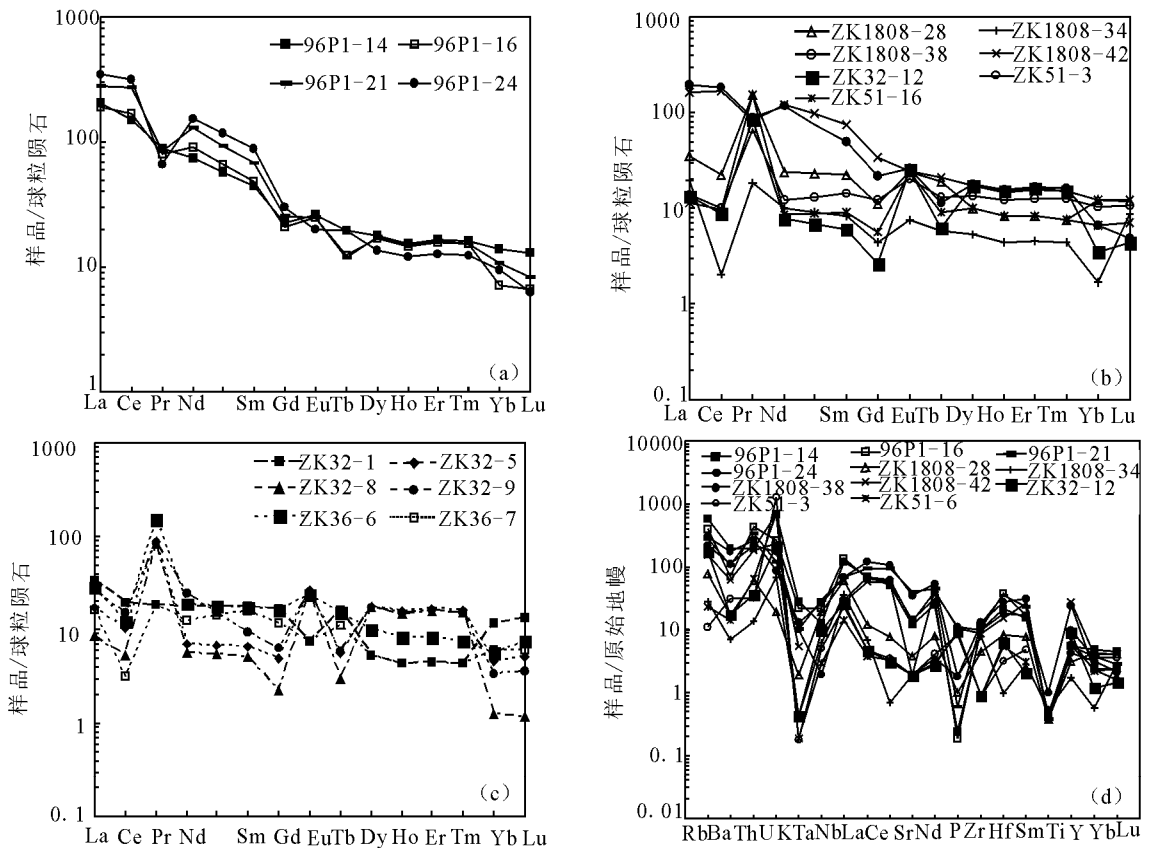


图 6 玉龙斑岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(a,b,c)和微量元素原始地幔标准化曲线(d)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE diagrams (a,b,c) and primitive mantle-normalized trace-element spider diagrams (d) for the Yulong porphyries

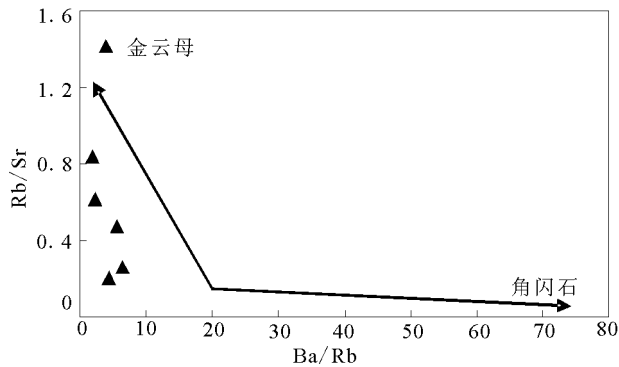


图 7 玉龙花岗斑岩 Rb/Sr-Ba/Rb 图解

Fig. 7 Diagram of Rb/Sr-Ba/Rb of the Yulong porphyries

源区有石榴子石残留,Rb的富集和Ba的亏损可能与源区金云母的熔融有关。由上述微量元素特征推断,玉龙斑岩源区含金云母、残留相中富集石榴子石和角闪石,这与样品的稀土元素特征所反映的信息是一致的。本区花岗斑岩具有高的Rb/Sr(>0.06)和低的Ba/Rb(<20)比值(图7),依据Graham(1999)的研究成果,表明其源区残留相主要为金云

母,而不是角闪石。

2.4 硫与氢氧同位素地球化学

本区硫同位素研究表明(表4),除玉龙矿区角岩、白云岩及围岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值及砂岩中的铜矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,其余岩体和围岩中样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为-0.5‰~5.97‰,接近于超镁铁质岩、基性岩和石陨石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,反映出玉龙矿区矿体的硫源主要来自上地幔或下地壳。而样品中 $\delta^{34}\text{S}$ 低值和高值的存在可能说明了原生岩浆成因的硫受到了围岩中硫化物和硫酸盐硫的局部混染(芮宗瑶,1984)。如果根据不同的矿石类型硫同位素的组成,可以看出从岩体到接触带,硫同位素组成变化范围依次变大,岩浆硫的比例依次减小。

玉龙斑岩铜矿流体包裹体的氢氧同位素的测定结果可以看出(表5): δD 变化于-75.1‰~116.7‰之间, $\delta^{18}\text{O}$ 变化于7.1‰~23.6‰之间,平均值为14.05‰,成矿流体来源于混有部分天水的岩浆水,说明含矿岩浆在上升侵位途中受到了地壳物质的混染。

表4 玉龙斑岩铜矿硫同位素组成

Table 4 The composition of sulfur isotope from Yulong porphyry copper deposit

产出		矿物	样品数	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$		资料来源
				变化范围	平均值	
II+V号矿体	ZK32-11	黄铁矿	1		2.05	本文
	ZK51-8	黄铁矿	1		1.76	
	ZK44-6	黄铁矿	1		1.06	
	ZK59-14	角岩黄铁矿	1		2.34	
	ZK32-W5	黄铁矿	1		1.68	
	ZK34-10	黄铁矿	1		5.97	
	ZK51-10	黄铁矿	1		2.40	
	ZK55-9	黄铁矿	1		1.54	
	ZK59-10	黄铁矿	1		1.39	
	ZK1808-14	黄铁矿	1		1.39	
	ZK1808-41	黄铁矿	1		1.37	
	ZK36-5	黄铁矿	1		2.93	
	ZK59-W1	矽卡岩型辉钼矿	1		-1.30	
	P1-31	砂岩型铜矿石	1		-11.49	
蚀变斑岩(I号矿体)		黄铁矿	23	-0.5~3.8	2.40	芮宗瑶,1984
蚀变斑岩		黄铜矿	6	+0.9~2.8	2.08	
蚀变斑岩		辉钼矿	2	+2.4~+2.8	2.60	
蚀变斑岩		黄铁矿+黄铜矿+辉钼矿	31	-0.5~+3.8	2.35	
矽卡岩		黄铁矿	9	+1.4~+2.3	2.05	
角岩+青磐岩		黄铁矿	14	-21.4~+1.1	0.14	
大理岩+白云岩		黄铁矿	4	+1.4~13.8	7.33	
蚀变围岩		黄铁矿	22	-21.4~13.8	1.80	

表5 玉龙斑岩铜矿矿物、包裹体中水的氢氧同位素组成

Table 5 Compositions of hydrogen and oxygen isotope of minerals and inclusions from Yulong porphyry copper deposit

样品编号	样品名称	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}, \text{SMOW})$	$\delta\text{D}(\text{‰}, \text{SMOW})$
ZK42-4	石英	10.2	-86.5
ZK21-6	高岭土	7.1	
ZK51-5	伊利石	23.6	-75.1
ZK51-6	粘土	9.6	-93.6
ZK59-1	粘土	17.2	
ZK32-16	粘土	16.6	-111.7
ZK35-5	高岭土		-116.7

注:由宜昌地质矿产研究所同位素实验室测试。

2.5 流体包裹体地球化学

玉龙斑岩铜矿的流体包裹体液相化学分析结果见表6,包裹体液相成分中阳离子以 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,并含有少量的 F^- 和 HCO_3^- 。包裹体气相成分以 H_2O 为主,其次是 CO_2 ,含微量 H_2 、 CO 和 CH_4 。根据库尔洛夫分类法,该矿床成矿流体属于Cl-Na-Ca型水溶液。

结合前人的研究成果(李荫清等,1981;唐仁鲤等,1995;王成善等,1996;谢玉玲等,2006),玉龙斑岩铜矿与斑岩矿化有关的成矿流体以高温、高盐度为特征的典型岩浆热液型流体。成矿流体主要来自含矿斑岩岩浆演化晚期的分凝流体,晚期有少量天

水注入成矿流体系统(Hou et al.,2009)。

2.6 成矿时代

前人已对玉龙斑岩铜矿含矿斑岩体作了较多同位素定年研究(表7)。综合众多的研究资料,成岩、成矿期的主要年代在40~35 Ma(芮宗瑶,2004)。

唐菊兴等(2009)通过对采自玉龙铜矿区及甘龙拉和纳加扎地区的辉钼矿和黑云母二长花岗岩斑岩进行同位素年代学研究,获得了成矿的精确时间为 41.6 ± 1.4 Ma,与成岩有关的黑云母二长花岗岩斑岩体侵位时间为 $43.0 \pm 0.5 \sim 43.8 \pm 0.7$ Ma,由此可知,玉龙斑岩铜矿的成矿作用发生大约是在1~2 Ma内完成的,与赋矿岩体的年龄也基本吻合。因此玉龙斑岩铜矿可能经历了多次岩浆活动及相关的成矿活动。

新生代以来,在三江北段地区,三江地区的变形变质年龄有3个高峰,即43.04 Ma、28.2 Ma、17.16 Ma,分别对应于早喜马拉雅阶段、中喜马拉雅阶段和晚喜马拉雅阶段,玉龙斑岩铜矿成矿年龄介于早喜马拉雅运动高峰期(43.04 Ma)与中喜马拉雅阶段高峰期(28.44 Ma)之间。

3 成矿模式

成矿早期以岩浆水为主,随着岩浆的冷凝固晶,

岩体发生钾硅酸盐蚀变、矽卡岩化,该期间一小部分的铜硫化物发生沉淀,大部分的铜仍存在硅酸盐矿物晶格中。

成矿中期,随着岩浆的上升冷凝、结晶,在岩体内部和斑岩体的角岩中形成细脉浸染型矿化,在接触带

形成矽卡岩型矿化,在隐爆角砾岩中形成角砾岩型矿化,在内外接触带上发生钾硅化和绢英岩化(图 8a)。由于天水的不断渗入,岩浆水和天水对流循环,在外接触带的角岩和大理岩发生青磐岩化。该期间大量的硫化物沉淀,形成大规模的矿石堆积体。

表 6 玉龙斑岩铜矿的流体包裹体成分分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 6 Components ($\times 10^{-6}$) of fluid inclusions in Yulong porphyry copper deposit

编号	矿物名称	爆裂温度 ($^{\circ}\text{C}$)	气相成分					液相成分							pH		
			H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	F ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
ZK42-4	石英	100~600	0.25	2.50	1.00	50.00	1000	4.40	5.86	1.00	0.21	0.00	50.00	6.40	5.00	0.00	6.97
ZK32-11	黄铁矿	100~400	0.30	0.00	0.00	50.00	350.0	1.74	1.34	6.00	1.05	0.01	28.0	2.00	120.00	0.00	5.40

注:由宜昌地质矿产研究所同位素室测试。

表 7 玉龙斑岩铜矿成岩、成矿年龄一览表

Table 7 Metallogenic age in Yulong porphyry copper deposit

岩石类型	测试方法	<i>t</i> (Ma)	资料来源	备注
昂可弄正长花岗斑岩	锆石 U-Pb	40.9	马鸿文,1990	
全岩矿物	Rb-Sr 等时线	52.0 \pm 0.2	马鸿文,1990	初始铯比值 0.70663
二长花岗斑岩	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	52.84 \pm 1.68	马鸿文,1990	
二长花岗斑岩	锆石 U-Pb	38.9 \pm 0.8	Jiang et al.,2006	
黑云母二长花岗斑岩和正长斑岩	Rb-Sr 等时线	44.5 \pm 2.5	芮宗瑶,2004	初始铯比值 0.70638
斑岩铜钼矿石	辉钼矿 Re-Os	40.1 \pm 1.8	Hou et al.,2003	
斑岩铜钼矿石	辉钼矿 Re-Os	40.1 \pm 1.8	唐菊兴等,2009	
赋矿岩体	锆石 U-Pb	41.6 \pm 1.4	梁华英,2002	
黑云二长花岗斑岩	锆石 U-Pb	43.6 \pm 0.8	郭利果,2006	
黑云二长花岗斑岩	锆石 U-Pb	43.0 \pm 0.5~43.8 \pm 0.7	王成辉等,2009	

成矿晚期以天水为主,地壳的抬升,矿体与地下水发生垂向的氧化淋滤作用,形成了一般硫化物矿床的表生分带,即氧化淋滤带—硫化物富集带—氧化物富集带(图 8b)。随着地壳的继续抬升和地表的剥蚀,铜等有用组分溶解于水形成侧向顺层迁移,原来形成的氧化物、硫化物富集带再次被溶解,当矿液到达矿体延伸方向的中部时,铜、铁的氧化物或金、银等元素形成次生氧化物富集带和硫化物富集带(图 8c)。迁移的过程中,由于物理化学条件的改变,铜、金、钴等有用元素的迁移能力降低,并随之沉淀,铜等主要金属储量由此阶段形成。

4 结论

玉龙斑岩铜矿三维实体模型的建立,为研究矿体以及矿石类型的空间分布规律提供了很好的工具。矿体的三维实体模型显示,I号矿体主要位于斑岩体中,矿体形态总体呈“蘑菇”状,在地表展布形态为“梨形”,其长轴为近南北向,短轴为近东西向;II号矿体产出于玉龙斑岩体东侧的矽卡岩带中,矿体呈“鞍状”产出;V号矿体产出于玉龙斑岩体西侧的

矽卡岩带中,在横向和纵向上均呈叠瓦状波状起伏;部分呈锯齿状产出。

岩石化学、硫同位素、氢氧同位素、稀土和微量元素特征表明:花岗斑岩的含矿性较好,硫源主要来自上地幔或下地壳,以地幔物质为主。成矿流体来源于混有部分天水的岩浆水,含矿岩浆在上升侵位途中受到了地壳物质的混染。

玉龙斑岩铜矿的成矿作用发生大约是在 1~2 Ma 内完成的,与赋矿岩体的年龄也基本吻合。玉龙斑岩铜矿岩浆具有热液多次沸腾的特点。成矿早期岩体发生钾硅酸盐蚀变、矽卡岩化,一小部分的铜硫化物发生沉淀;成矿中期岩体内部和斑岩体的角岩中形成细脉浸染型矿化,在接触带形成矽卡岩型矿化,在隐爆角砾岩中形成角砾岩型矿化,大量硫化物沉淀。铜等主要的金属元素则在成矿晚期富集成矿。成矿晚期矿体与地下水发生垂向的氧化淋滤作用,形成氧化淋滤带—硫化物富集带—氧化物富集带。

致谢: 成文及发稿过程中得到了中国地质科学院侯增谦研究员及有关专家、编审的精心指导与帮助,此致诚挚的谢意。

注释

① 王成善,陈建平,唐菊兴,等. 1996. 西藏玉龙铜矿床似层状矿体成矿作用及有用元素赋存状态研究. 成都理工大学档案馆.

参考文献

陈建平,邓江红,李葆华,等. 1997. 西藏玉龙上三叠统甲丕拉组沉积特征及铜矿质的初步富集. 沉积学报, 3:111~118.

陈建平,王成善,唐菊兴,等. 1998. 西藏玉龙铜矿床次生氧化富集作用机制. 地质学报, 72(2):152~162.

陈文明. 1980. 斑岩铜矿与杂色砂页岩型层状铜矿内在联系的初步探讨. 地质论评, 26(6):526~528.

陈文明. 1984. 玉龙斑岩铜矿与杂色砂岩铜矿成矿作用的内在联系. 地质论评, (3):239~252.

陈文明,盛继福,钱汉东. 2006. 西藏玉龙斑岩铜矿含矿斑岩体钾长石斑晶的有序度及成因探讨. 岩石学报, 22(4):1017~1022.

顾雪祥,唐菊兴,王成善,等. 2004. 西藏玉龙铜矿床似层状氧化富铜矿体的形成机制:沸腾-酸滤模式. 矿床学理论与实践. 北京:科学出版社,140~15.

侯增谦,莫宣学,高永丰,等. 2003. 埃达克岩:斑岩铜矿的一种可能的含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. 矿床地质, 22(1):1~12.

胡明铭,唐菊兴,陈建平. 1998. 论藏东玉龙铜矿似层状矿体的表生氧化成矿作用. 矿物岩石, 18(2):78~84.

黄朋,顾雪祥,唐菊兴,王立全. 2002. 西藏玉龙斑岩(铜)矿床物质来源研究. 大地构造与成矿学, 26(4):429~435.

姜耀辉,蒋少涌,凌洪飞,等. 2006. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例. 岩石学报, 22(3):697~706.

李荫清,芮宗瑶,程莱仙. 1981. 玉龙斑岩(铜)矿床的流体包裹体及成矿作用研究. 地质学报, 55(3):216~237.

李荫清. 1984. 玉龙某些中酸性侵入岩和火山杂岩中的熔融和流体包裹体. 中国地质科学院院报, 85~106.

李荫清. 1985. 我国几个重要(主要)斑岩铜(钼)矿床的包裹体演化机制及成矿 pH 条件. 矿床地质, 4(2):51~60.

梁华英. 2002. 青藏高原东南缘斑岩铜矿成岩成矿研究取得新进展. 矿床地质, 21:365.

马鸿文. 1989. 论藏东玉龙斑岩铜矿带岩浆活动的构造环境. 岩石学报, (1):1~11.

马鸿文. 1990. 藏东玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿. 武汉:中国地质大学出版社,158.

孟祥金. 2004. 西藏碰撞造山带冈底斯中新世斑岩铜矿成矿作用研究. 北京:中国地质科学院博士论文,1~104.

芮宗瑶. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京:地质出版社,350.

芮宗瑶,李光明,张立生,等. 2004. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应. 地学前沿, 11(1):145~154.

唐菊兴,王成善,黄卫,等. 2004. 西藏玉龙铜矿成矿体系各矿体存在形式及其定位预测. 矿床学理论与实践. 北京:科学出版社,282~292.

唐菊兴,张丽,李志军,等. 2006. 西藏玉龙铜矿床——鼻状构造圈闭控制的特大型矿床. 矿床地质, 25(6):653~664.

唐菊兴,王成辉,王登红,等. 2009. 西藏玉龙斑岩铜钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其成矿学意义. 岩矿测试, 28(3):215~218.

唐仁鲤,罗怀松. 1995. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质. 北京:地质出版社,320.

谢玉玲,侯增谦,徐九华,等. 2006. 藏东玉龙斑岩铜矿床多期流体演

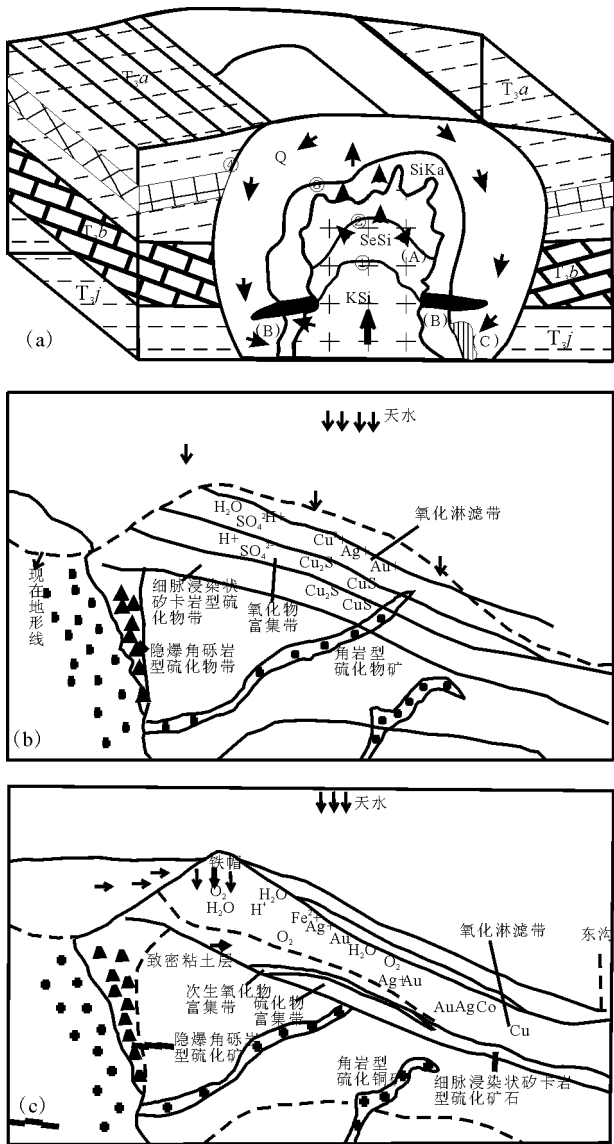


图 8 玉龙斑岩铜矿成矿模式图(据陈建平,1997)

Fig. 8 Mineralization model from the Yulong porphyry copper deposit (after Chen et al., 1997)

(a) 斑岩-砂卡岩成矿作用模式: T_{3j}—上三叠统甲丕拉组; T_{3b}—上三叠统波里拉组; T_{3a}—上三叠统阿堵拉组; KSi—钾硅化带; SeSi—绢英岩化带; SiKa—硅化粘土化带; Q—青磐岩化带; ①~④—蚀变带间界限; A—细脉浸染型矿化; B—砂卡岩型矿化; C—角岩型矿化; (b)—早期垂向氧化成矿作用模式; (c)—侧向迁移-叠加富集成矿作用模式

(a)—Mineralization model for the porphyry and skarn; T_{3j}—Jiapila Formation of Upper Triassic; T_{3b}—Bolila Formation of Upper Triassic; T_{3a}—Adula Formation of Upper Triassic; KSi—potassic-silicis alteration zone; SeSi—phyllitic alteration zone; SiKa—silicic-clay alteration zone; Q—porphyry alteration zone; ①~④—alteration zone limit; A—veinlet-dissemination mineralization; B—skarn type mineralization; C—hornfels type mineralization; (b)—mineralization model of vertical oxidation; (c)—mineralization model of lateral migration and stacked enrichment

- 化与成矿的流体包裹体证据. 岩石学报, 21(5):1409~1416.
- 曾普胜, 侯增谦, 高永峰, 杜安道. 2006. 印度-亚洲碰撞带东段喜马拉雅雅期铜-钼-金矿床 Re-Os 年龄及成矿作用. 地质论评, 52(1): 72~84.
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件. 矿床地质, 23(2):150~163.
- 张玉泉, 谢应雯, 邱华宁, 李献华, 钟孙霖. 1998a. 钾玄岩系列:藏东玉龙铜矿带含矿斑岩元素地球化学特征. 地球科学, 23:557~561.
- 张玉泉, 谢应雯, 邱华宁, 等. 1998b. 钾玄岩系列:藏东玉龙铜矿带含矿斑岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成. 地质科学, 33:359~366.
- 周宜吉. 1980. 玉龙矿带中斑岩铜矿的控矿因素及其成因探讨. 地质论评, 26(4):357~361.
- 周宜吉. 1985. 试论玉龙斑岩铜矿带内矿床的蚀变和矿化分带. 矿床地质, 4(2):23~30.
- 周宜吉. 1986. 西藏东部玉龙斑岩铜矿带找矿方法综合运用的效果和经验. 地质与勘探, 12:16~19.
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, et al. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet. Econ. Geol., 98:125~145.
- Hou Z Q, White N C, Qu X M, et al. 2009. Post-collisional porphyry Cu deposits: a new class unrelated to subduction? (in review).
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constrains. Earth Planet., 241:617~633.

Geological Characteristics and Metallogenic Model in the Yulong Porphyry Copper Deposit, East Tibet

CHEN Jianping^{1,2)}, TANG Juxing^{3,4)}, CONG Yuan^{1,2)}, DONG Qingji^{1,2)}, HAO Jinhua^{1,2)}

1) *Institute of Land Resources and High Techniques, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

2) *Beijing Key Laboratory of Research and Exploration Information of Land Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

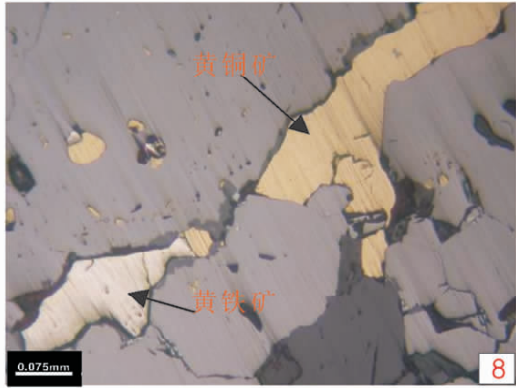
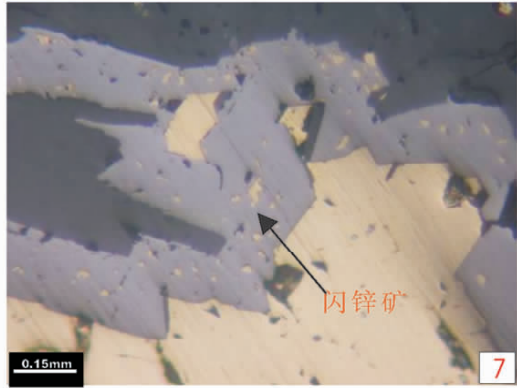
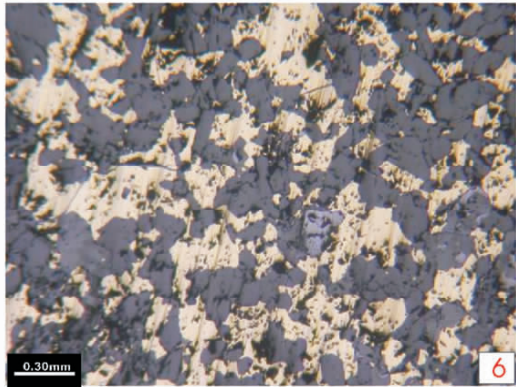
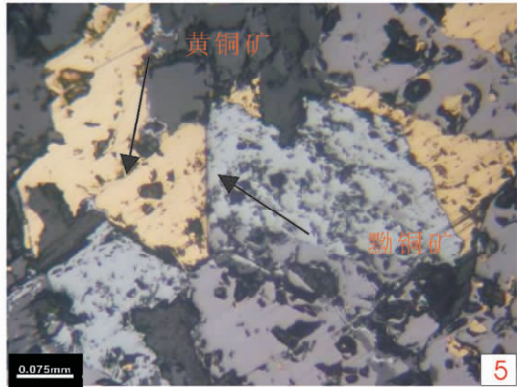
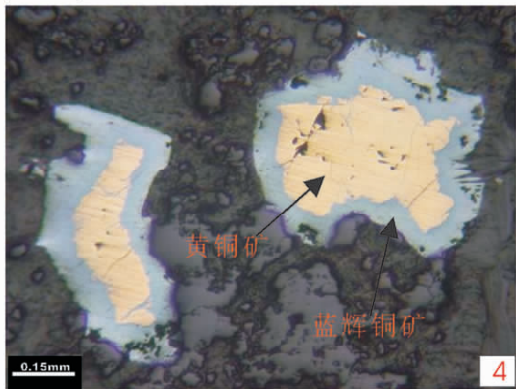
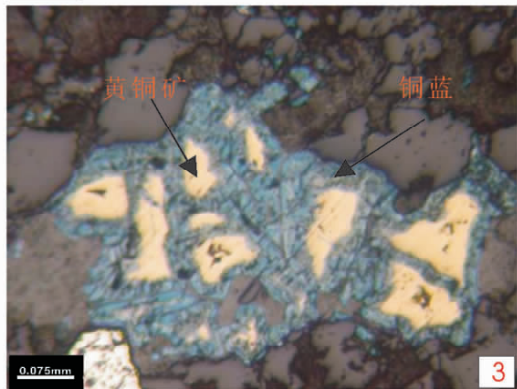
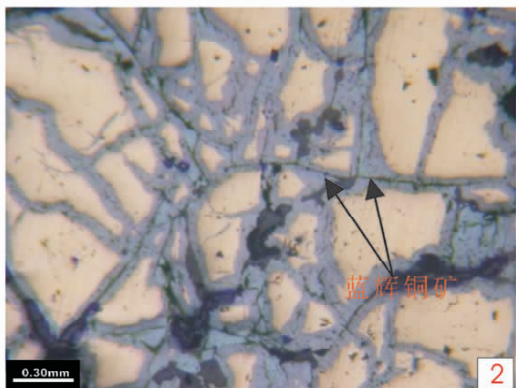
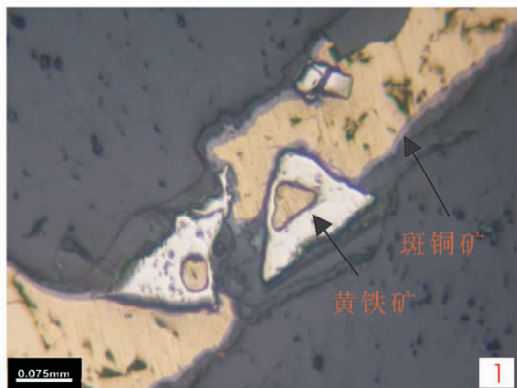
3) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

4) *College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059*

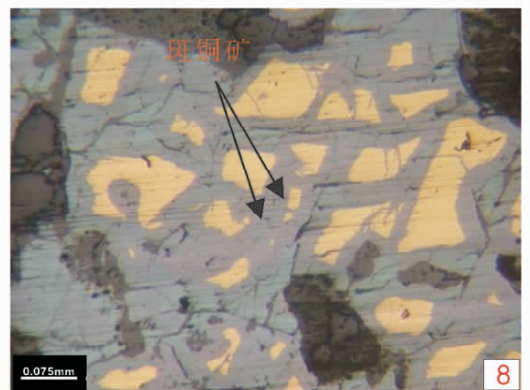
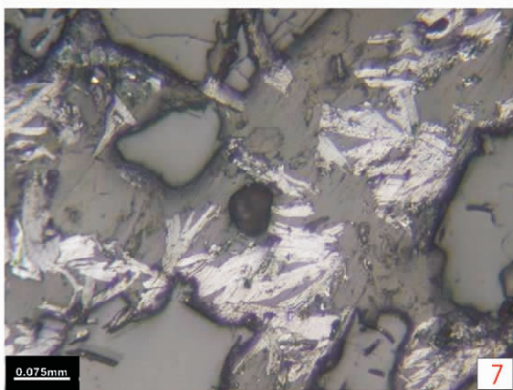
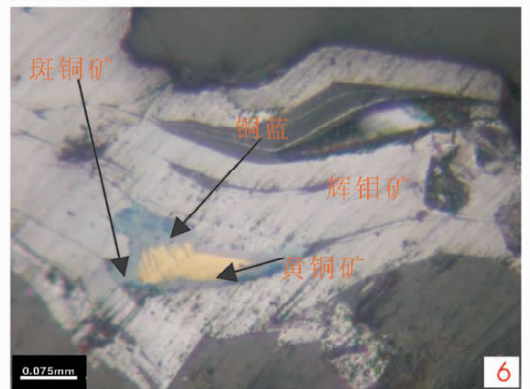
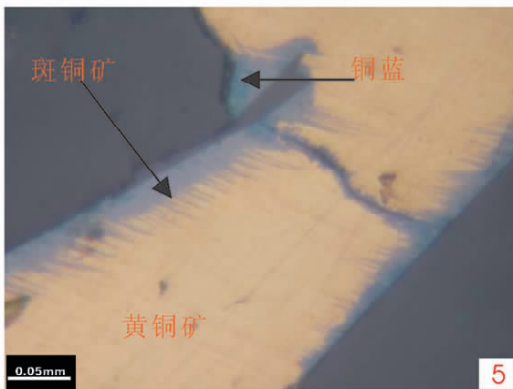
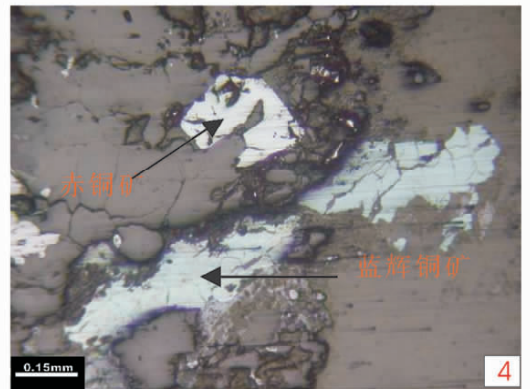
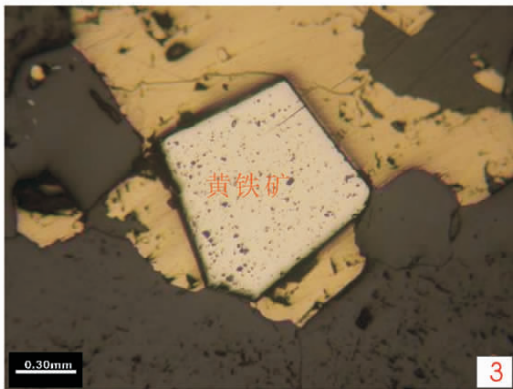
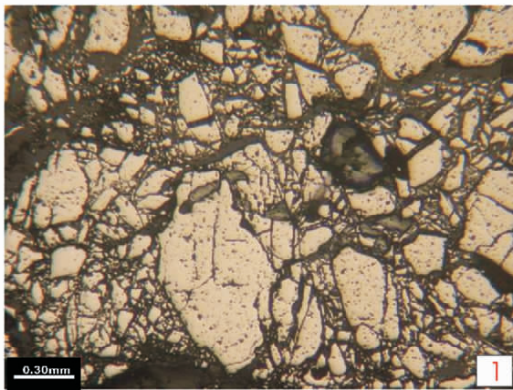
Abstract

The Yulong porphyry copper deposit, one of the super-large porphyry copper deposits in the world, has aroused great interest among researchers and a great amount of achievement has been made since its discovery. With the exploitation of Yulong porphyry copper deposit entering into a new phase, it is important to review and summarize the study results of Yulong porphyry copper deposit because the understanding of mineralization characteristics and model will not only give a exploration direction in the area but provide a solid base for subsequent exploration. This study, taking use of Micromine, established a 3-D model of main orebodies and then analyzed the spatial distribution rules of orebodies and ore types. Based on the analysis of whole-rock, trace elements and REE, and geochemical characteristics of fluid inclusion, metallogenic model of the Yulong porphyry copper deposit in combination with isotopic dating was established. Therefore, the establishing of the model is of great significance for guiding the exploration breakthrough and potential assessments both in the Yulong porphyry copper deposit as well as porphyry copper deposits in the Sanjiang area.

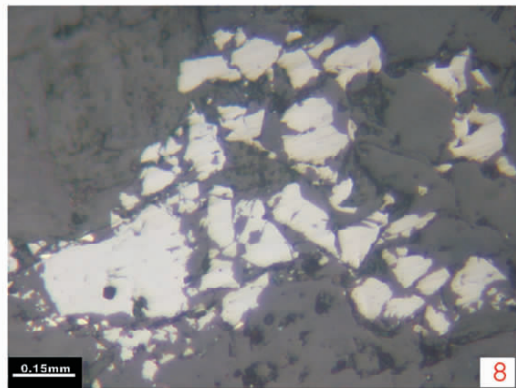
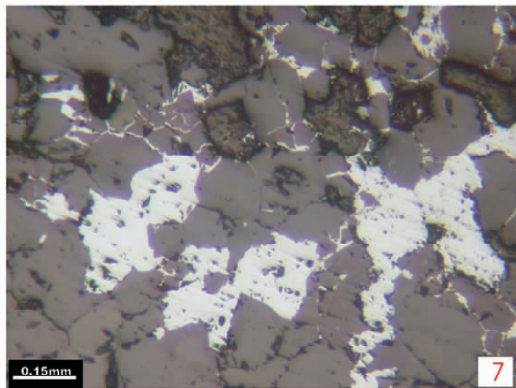
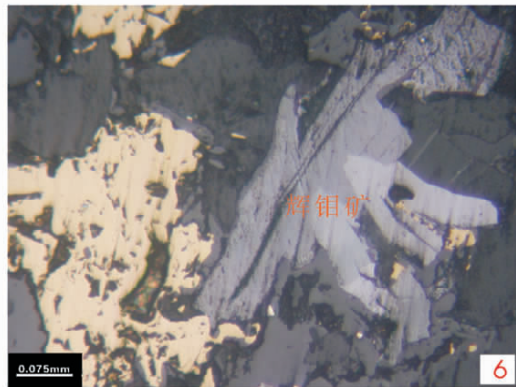
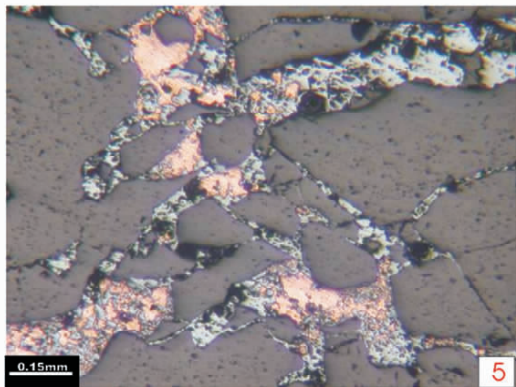
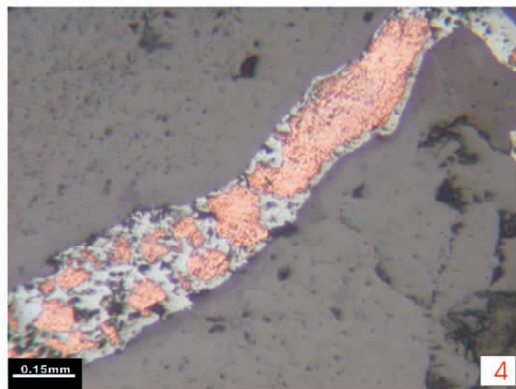
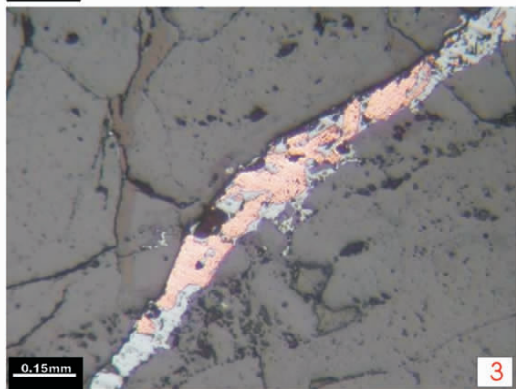
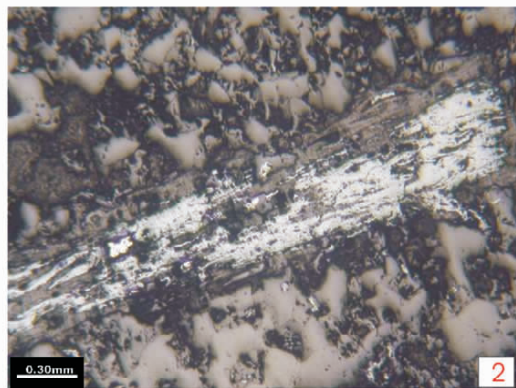
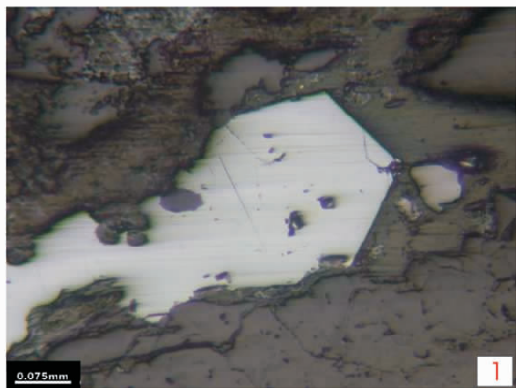
Key words: porphyry copper deposit; geological characteristics; metallogenic model; Yulong



1. 产于岩石裂隙中脉状黄铜矿局部被黄铁矿交代,两者边缘又被斑铜矿交代呈反应边结构。
2. 蓝辉铜矿在黄铜矿颗粒间和内部裂纹中呈网脉状产出。
3. 粒状黄铜矿被铜蓝交代呈岛弧状残余。
4. 反应边结构:蓝辉铜矿沿黄铜矿边缘交代而成。
5. 他形粒状黝铜矿的一边与黄铜矿的四方偏三角体连生后被他形晶黄铜矿交代。
6. 稠密浸染状构造:他形晶黄铜矿在脉石矿物中较均匀分布而成。
7. 粗粒黄铜矿与内部矿连生,而细粒黄铜矿沿闪锌矿内部交代。
8. 黄铜矿和黄铁矿呈脉状充填交代磁铁矿粒间空隙。



1. 斑状压碎结构:黄铁矿受力被压碎成碎粒。
2. 黄铁矿受力发生破碎,同时内部裂纹发育,后被蓝辉铜矿沿空隙充填交代呈网状。
3. 嵌晶结构:自形晶黄铁矿镶嵌于黄铜矿中。
4. 半自形赤铜矿和短脉状蓝辉铜矿分布于脉石矿物中。
5. 斑铜矿和铜蓝沿黄铜矿边缘交代呈花边状结构。
6. 弯曲长板状辉钼矿集合体中有一粒状他形晶黄铜矿被斑铜矿和铜蓝从边缘向内部交代。
7. 叶片状辉钼矿集合体构成束状、放射状产于脉石矿物中。
8. 黄铜矿被斑铜矿矿化交代呈弧岛状残余。



1. 赤铜矿呈他形粒状产于脉石矿物中。
2. 呈脉状的赤铜矿(长条状集合体)产于脉石矿物中。
3. 呈脉状产出的自然铜被赤铜矿沿边缘向内部交代呈反应边结构和残余结构。
4. 填隙结构:自然铜和赤铜矿沿脉石矿物间隙充填而成。
5. 浸蚀结构:脉状自然铜被赤铜矿从边缘向中心交代而成。
6. 产于脉石矿物中的板状辉钼矿集合体和他形晶黄铜矿。
7. 赤铜矿呈他形粒状产于脉石矿物中,有的呈细脉状围绕脉石矿物晶粒呈结状。
8. 辉铜矿呈他形粒状分布于脉石矿物中。