

中甸普朗斑岩型铜矿床围岩蚀变初步研究

胡清华¹, 张世权¹, 尹 静², 黄定柱¹, 伍健兢¹,
孟 青¹, 杨丽梅¹, 罗光明¹

1. 云南省地质调查局, 昆明 650051; 2. 昆明理工大学, 昆明 650093

摘 要: 普朗斑岩型铜矿床是近年发现的一个重要铜矿床, 通过大量的野外地质资料收集和室内综合分析研究, 结合钻探、物探、化探和遥感技术应用的成果, 初步认为普朗印支期斑岩铜矿床热液蚀变是经过多期次、多阶段构造-热液事件形成的, 具有由中心向外依次为硅化核、硅化、钾化带-绢英岩化带-青磐岩化带-角岩化带的面型蚀变特征。其中硅化、钾化、绢英岩化蚀变带与铜矿关系密切。蚀变作用既影响岩(矿)石的结构、构造, 又导致矿石中主要氧化物含量和 Cu 品位的变化。矿化与蚀变引起的物探、化探和遥感异常有较好的关联性, 异常是找矿与勘查的直接标志和指导工程布置的依据, 对于在中甸地区寻找与勘查同类型矿床有重要意义。

关 键 词: 斑岩铜矿; 围岩蚀变; 面型蚀变分带; 蚀变与矿化; 中甸普朗

中图分类号: P618.410.174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2010)02-0192-10

A Study of Wall-rock Alteration in the Zhongdian Pulang Porphyry Copper Deposit

HU Qing-hua¹, ZHANG Shi-quan¹, YIN Jing², HUANG Ding-zhu¹, WU Jian-jing¹,
MENG Qing¹, YANG Li-mei¹, LUO Guang-ming¹1. Yunnan Geological Survey, Yunnan Kunming 650051, China; 2. Kunming University of Science and
Technology Yunnan Kunming 650093, China

Abstract: The Pulang porphyry copper deposit discovered recently is an important copper deposit. On the basis of collection of a large number of field geological data, comprehensive analyses in laboratories, and combination of the results of drilling, physical and geochemical explorations, and remote sensing technology, our preliminary conclusion is that the hydrothermal alteration of India Support phase Pulang porphyry copper deposit, which has the surface-type alteration features of silicified core, potassic silicification zone, sericite rock band, propylite band, and angle rock-oriented band arranging regularly from core to out surface, is a result of Multi-periods and multi-phases construction hydrothermal events. The potassium-based silicification and sericite alteration zones were found to have close connection with the copper deposit; the alteration has effects on the rock (ore) structure which controls the contents of main oxides of rocks and the grade changes of the Cu deposit. Meanwhile, the physical-geochemical anomalies caused by mineralization and alteration showed very good correlation with the anomalies of remote sensing. The anomalies, which have great significance in searching and exploring of the same type deposit in the Zhongdian area, are the direct indicators for ore exploration and the guider for mine engineering layout.

Key words: porphyry copper deposit; wall-rock alteration; surface-type alteration zone; alteration and mineralization; Zhongdian Pulang

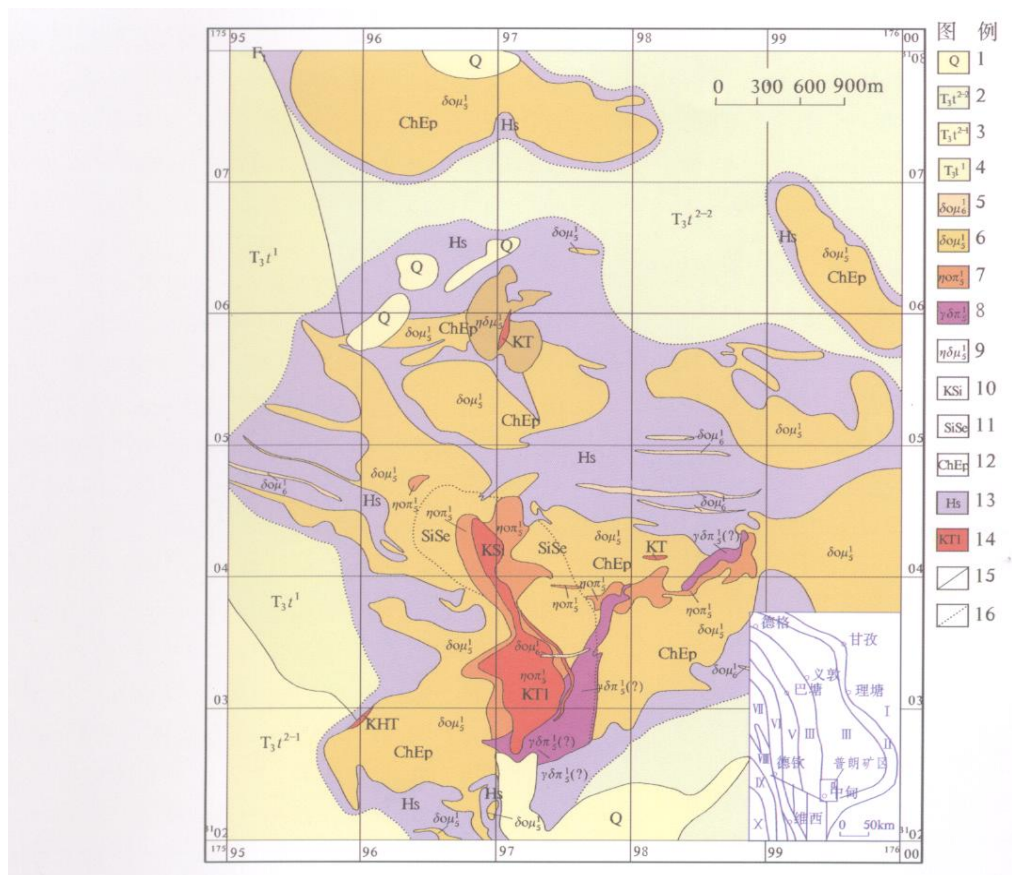
普朗斑岩铜矿床位于义敦岛弧南段的中甸火山-岩浆弧之中(图 1), 已探明铜金属量 114 万 t, 铜平均品位 0.57%, 伴生金 28.80 t、钼 6399 t, 矿床远景储量可达 400 万 t, 是一个具有特大规模找矿潜

力的斑岩型铜矿床。该矿床是近年国内发现的重要斑岩型铜矿床, 其形成的构造环境与成因及成矿时代^[1~5]、矿床地质特征^[6,7]已有较多报道。但与成矿有关的热液蚀变的研究不多。本文从微观到宏观对

收稿日期: 2009-09-15 收到, 12-06 改回

基金项目: 云南省项目(12120107810017, 2009CB421007); 国家科技支撑课题(2006BAB01A07)

第一作者简介: 胡清华(1971—), 男, 工程师, 从事找矿与勘探。E-mail: hyx216@126.com



1. 第四系残坡积物; 2. 三叠系图姆沟组二段第二层; 3. 三叠系图姆沟组二段第一层; 4. 三叠系图姆沟组一段; 5. 石英闪长玢岩(脉); 6. 石英闪长玢岩; 7. 石英二长斑岩; 8. 花岗闪长斑岩; 9. 二长闪长玢岩; 10. 钾化硅化带; 11. 硅化绢云母化带; 12. 青磐岩化带; 13. 角岩化带; 14. 矿体及编号; 15. 岩性分界线; 16. 蚀变界线; I. 扬子陆块; II. 甘孜—理塘结合带; III. 义敦岛弧带; IV. 中咱微陆块; V. 金沙江结合带; VI. 江达—维西火山弧; VII. 昌都—兰坪陆块; VIII. 三达山—景洪火山弧; IX. 澜沧江结合带; X. 保山地块

1. Residual slope sediments of Quaternary; 2. Tum Triassic Formation in the second tier, Sec; 3. Tum Triassic Formation in the second tier, Sec; 4. Tum Formation in the Triassic period; 5. Quartz diorite porphyry dykes; 6. Quartz diorite porphyry; 7. Quartz monzonite porphyry; 8. Granodiorite porphyry; 9. two diorite porphyry; 10. K of silicified zone; 11. Silicified sericite zone; 12. Plate rocks of Green Belt; 13. Rock-based band; 14. Ore body and number; 15. Lithologic boundary; 16. Boundary alteration; I. Yangtze block; II. Garze-Litang suture zone; III. Yidun arc zone; IV. Zongza micro-continental block; V. Jinsha River suture zone; VI. Jomda-Vici volcanic arc; VII. Qamdo-Lanping landmass; VIII. San-Jing-hong volcanic arc; IX. Lancang River suture zone; X. Baoshan block

图 1 普朗铜矿区地质图

Fig 1 The geological map of the Pulang copper deposit

该矿床围岩蚀变的形成过程进行了全面的讨论。

1 地质概况

普朗铜矿床位于中甸岛弧东斑岩带中南部,矿体主要产于普朗复式岩体之中,且受到区域北西向构造控制。复式岩体主要由石英闪长玢岩、石英二长斑岩和花岗闪长斑岩构成,主体为石英闪长玢岩。杂岩体大致可划分出边缘相和中心相(图 1)。其中,石英二长斑岩为中心相,石英闪长玢岩为边缘相,花岗闪长斑岩则为晚阶段产物;石英二长斑岩与石英闪长玢岩表现为渐变关系,而与花岗闪长斑岩为突变关系。从中心到边缘呈现从中酸性到中性成分的演化趋势。研究表明,岩体属壳幔混合成

因^[8,9]。含矿岩体为石英闪长玢岩和石英二长斑岩,主矿体(KT1,占储量 90%以上)产于岩体中心部位的石英二长斑岩体中(图 1)。矿区出露的地层主要为上三叠统图姆沟组(T_3t)^[10],自下而上可分成三个岩性段:

一段(T_3t^1):为灰色-深灰色板岩、绢云板岩、变质砂岩,夹灰岩、含砾绢云板岩,含晚三叠世薄壳双壳类等化石,厚 488~634 m。

二段(T_3t^2):为灰或深灰色板岩、粉砂质绢云板岩夹中酸性火山岩及硅质岩,板岩中含大量薄壳双壳类化石,厚 2347~2713 m。

三段(T_3t^3):见于矿区外围,主要为灰色、深灰色板岩、粉砂质绢云板岩,夹变质长石石英砂岩、结

晶灰岩,厚度大于 270 m。

矿区位于普朗背斜东翼,轴向与北西向区域构造线一致,背斜总体呈穹隆状,核部为普朗复式岩体,图姆沟组围绕分布,广泛角岩化蚀变,发育小褶皱和揉皱等。

2 围岩蚀变类型和矿物特征

2.1 矿区蚀变类型

通过岩矿分析、PIMA 和 SP 短波红外光谱技术,获得矿区蚀变矿物分布的特征规律^[11]。矿区主要蚀变矿物为伊利石、镁绿泥石、多水高岭石、硬石膏、蒙脱石、黑云母(以上矿物体积百分数大于 10%)和铁镁绿泥石、多硅白云母、白云母、阳起石、金云母、方解石(以上矿物体积百分数大于 5%)等。大致确定了围岩蚀变类型主要有钾长石化、黑云母化、钠长石化、硅化、绢云母化、粘土化、绿泥石化和钠黝帘石化等(图 1)。

(1) 钾长石化:为特征蚀变之一。表现形式有 3 种:1) 次生钾长石和石英呈不均匀团块分布,或呈他形晶充填于石英颗粒间;2) 钾长石呈不规则他形晶交代基质中的钠长石和石英,构成交代包含结构;3) 次生钾长石和碳酸盐等矿物一起呈脉状分布。

(2) 黑云母化:次生黑云母交代原生斜长石、黑云母、石英及次生钾长石。次生黑云母主要呈细鳞片状集合体沿裂隙呈脉状分布,少部分呈不均匀状交代角闪石和基质中的斜长石。

(3) 钠长石化:在斑岩体定位后,早期发生的一种面型蚀变作用,表现为斜长石的去钙作用,使斜长石部分变为钠长石。在成矿作用晚期,也常出现一些脉状钠长石。

(4) 硅化:是矿区分布最广的蚀变作用,表现为多期性:1) 早期硅化表现为微粒石英集合体,呈弥散性分布;2) 中期以基质中的石英次生增大为特征,常与绢云母、黄铁矿伴生,是绢英岩化带的主要标志;3) 晚期以脉状发育为特征,是富矿体的重要标志。

(5) 绢云母化:也是矿区最常见的蚀变,表现为以下 4 种形式:1) 斜长石的绢云母化:表现为绢云母沿裂隙或从环带中心交代斜长石,并逐渐向外扩张。交代不完全时,外圈常有残留,与绢云母接触的边缘往往出现钠长石化;交代完全时,整个斑晶都被鳞片状绢云母所取代,只保留假象(图版 1)。当绢云母化作用足够强时,则基质斜长石也被绢云母化。2) 钾长石的绢云母化:钾长石斑晶也常被绢云母交代。与斜长石绢云母化不同的是,交代作用往往是从斑晶的边缘或裂隙处开始,逐渐向内发展(图版 2)。

完全绢云母化时,原岩结构被破坏,表现为绢云母和石英的不规则状或团块状集合体。3) 黑云母的绢云母化:表现为黑云母的褪色,时见黑云母被鳞片状绢云母取代。蚀变过程中常析出赤铁矿和磷灰石等,并与黄铁矿、黄铜矿等共生。4) 绢云母脉:绢云母常与石英、金属硫化物以脉状产出。

(6) 粘土化:仅见于局部,强度不大。表现为长石矿物的粘土化。

(7) 绿泥石化和钠黝帘石化:普遍发育,构成岩体的外蚀变带(青磐岩化带),同时叠加在其余蚀变带上。表现为绿泥石、钠黝帘石的交代和碳酸盐脉的产出。

2.2 围岩蚀变分带依据

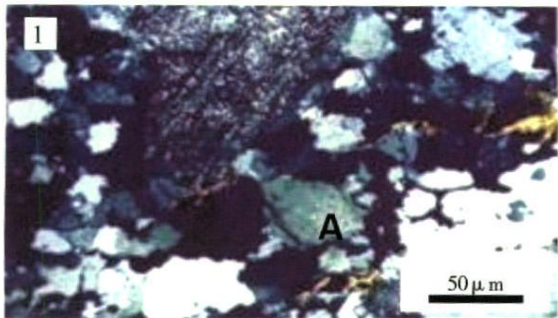
矿体热液蚀变分带明显,中心为较高温蚀变,向两侧依次递变为较低温蚀变,相邻蚀变作用常呈渐变关系,大体按如下方式依次进行:1) 在岩浆体系热能的作用下,地下水被加热活化,从而在岩体四周产生范围宽广的角岩化接触热变质作用。2) 岩浆期后热液先由下而上运移,进入浅部孔隙发育地段后沿近水平由内向外,与围岩反应,形成一系列的蚀变与矿化。3) 岩浆期后热液的上侵扩散是多期次进行的,每次均会形成一套蚀变分带,各期次蚀变互相重叠,造成了复杂的分带局面。

3 围岩蚀变与蚀变的化学反应

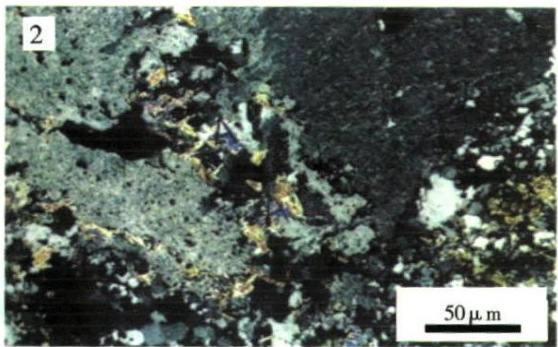
3.1 蚀变

普朗复式岩体大致可分为 3 期 4 种岩石类型。最早为石英闪长玢岩或石英二长闪长玢岩,中期为石英二长斑岩,晚期为花岗闪长斑岩,少量闪长玢岩,呈中性-中酸性-酸性的演化趋势。早期玢岩的热液蚀变以钠黝帘石化、绿泥石化、绢云母化为主;中期斑岩发育有硅化、钾化、绢云母化等。早、中期蚀变岩石中均发育有石英和石英钾长石细脉,并伴有弱-中等强度的黄铁矿化、黄铜矿化、磁黄铁矿化,偶有辉钼矿化。晚期花岗闪长斑岩中亦有弱-中等强度的黄铁矿化、黄铜矿化和磁黄铁矿化;晚期玢岩呈脉状穿插于早、中期岩石中,无矿化。岩体蚀变分带明显,由内向外依次为:硅化核-硅化钾化带(黑云母化、钾长石化)-绢英岩化带(绢云母化、硅化)-青磐岩化带(绿泥石化、绿帘石化)-角岩化带。矿化岩体以硅化-钾化带、绢英岩化带中的铜矿化最强(图 1)。

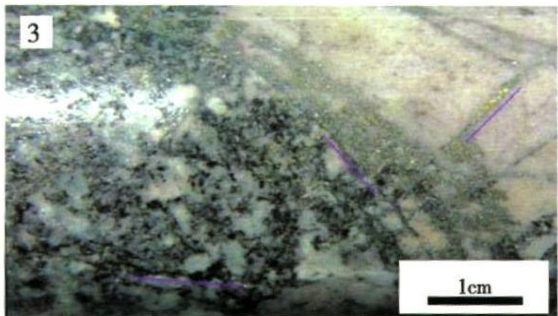
3.1.1 岩体的热液蚀变 有硅化核、钾化-硅化绢云岩化带和青磐岩化带。



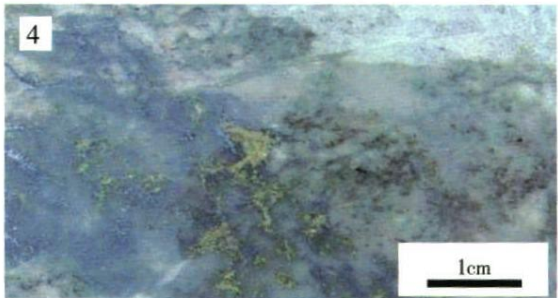
图版 1 斑状结构,斑晶为斜长石,基质为石英、钾长石、钠长石和黑云母,斜长石绢云母化(A),晶体浑浊透射正交偏光
Plate 1 Porphyritic texture,phenocrysts of plagioclase,matrix of quartz,feldspar,sodium feldspar and biotite,plagioclase sericite(A), lens opacity transmission



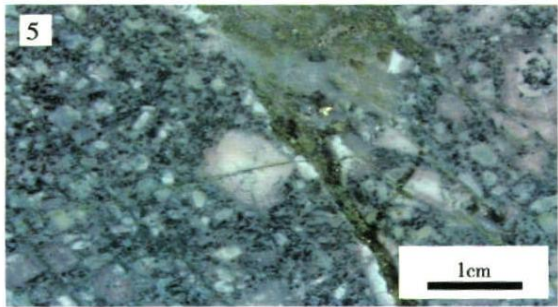
图版 2 钾长石斑晶的裂隙中 A,充填细小的它形粒状钠长石和白云母(绢云母)透射正交偏光
Plate 2 K-feldspar phenocrysts of the fissures in the A, it is filling a small granular form of sodium feldspar and muscovite (sericite), Transmission orthogonal polarizer



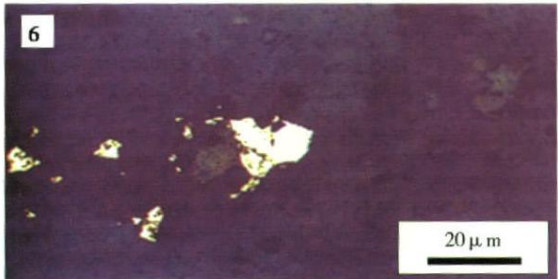
图版 3 铜矿化石英二长斑岩发育三组节理
Plate 3 Quartz monzonite porphyry copper-based development of three sets of joints



图版 4 强硅化石英二长斑岩中产出的黄铜矿和辉钼矿
Plate 4 Strong silicified quartz monzonite porphyry in the output of chalcopyrite and molybdenite



图版 5 蚀变石英二长斑岩及矿石中黄铜矿细脉浸染状构造
Plate 5 Plate 4 altered quartz monzonite porphyry and ore veinlets disseminated chalcopyrite-like structure



图版 6 它形粒状黄铜矿(黄色)半包裹半自形的黄铁矿(亮黄色)反射单偏光
Plate 6 Shaped granular chalcopyrite (yellow)half-wrapped semi-euhedral pyrite (bright yellow). Reflect a single polarizer



图版 7 它形粒状黄铜矿(黄色)半包裹半自形的黄铁矿(亮黄色)反射单偏光
Plate 7 Shaped granular chalcopyrite (yellow) half-wrapped semi-euhedral pyrite (bright yellow). reflect a single polarizer

(1)硅化核(Si):它对应于斑(玢)岩体的中心部位,以强硅化为特征。表现为长石斑晶被硅质取代,但长石斑晶仍保留假象;基质也大部分被硅质取代,岩石变得坚硬、致密。硅化形成的石英脉大量穿插于石英二长斑岩中,脉宽 0.5~3 mm,多呈网脉状分布,排列不规则。硅化核中虽见少量黄铜矿和辉钼矿,但矿化较弱,铜品位一般在 0.3% 以下,星点状分布,辉钼矿矿化不均,呈稀疏细脉状分布。

(2)钾化硅化带(KSi):岩石被强烈交代。蚀变矿物总量约占 20%~25%,主要为钾长石化,局部

有黑云母化,斜长石斑晶发生绢云母化和钠黝帘石化。角闪石和黑云母普遍蚀变成绿泥石,钾长石表面叠加有泥化。

次生钾长石呈粒状变晶结构不规则状相互镶嵌充填于斑晶和基质中。次生钾长石交代原生钾长石、斜长石、黑云母斑晶及其基质,部分次生钾长石粒径可达1 cm,与原生钾长石不易区分。次生黑云母呈团块状、聚斑状、脉状交代原生斜长石、黑云母、石英和次生钾长石。次生黑云母交代次生钾长石,表明黑云母化晚于钾长石化(图版3)。

硅化形成的微粒石英,呈他形粒状充填于上述斑晶及基质间,交代原生斜长石、黑云母、石英,以及次生钾长石,表明硅化晚于钾长石化。

该蚀变带的黄铜矿、黄铁矿不规则状,与显微粒状钾长石、黑云母紧密伴生,表明黄铜矿、黄铁矿为钾化的产物。局部可见碳酸盐交代原生和次生矿物,属最后的蚀变。

综上所述,岩石蚀变顺序为钾长石化、黑云母化(含黄铜矿、黄铁矿化)→硅化→碳酸盐化。这种蚀变分带主要分布在石英二长斑岩之中,在石英闪长玢岩和花岗闪长斑岩中也有分布。钾长石化和黑云母化,是矿区内最强烈的蚀变之一,发育于二长斑岩的中心部位,大体对应于含钼的铜矿带,分布于硅化核(Si)之外,并以强钾交代和硅化为特征。蚀变方式多样,形成大量钾长石和石英,伴有少量黑云母脉。可见各种形式的钾长石化、黑云母化。硅化表现为石英斑晶的形成和再生长,基质硅化后伴有石英细脉(包括石英金属硫化物脉等)。原岩中的角闪石被次生黑云母取代,变化过程中释出的钙和微量元素与热流体的有关组分结合,形成磷灰石、锆石等次生副矿物。

本带是矿区内最重要的含矿部位,矿化以黄铁矿化为主,矿化“面型”分布,KTI矿体分布其中,矿体长1600 m,宽200~600 m,厚大于100 m,最厚达500 m以上,铜品位0.20%~3.74%,平均0.57%,矿化较均匀,铜矿物多呈细脉浸染状分布,矿区的大部分铜资源量集中该带。黄铁矿呈细脉状、局部浸染状、团块状分布,其含量和黄铜矿呈负相关。局部伴生金含量较高,可达0.8 g/t。

(3) 绢英岩化带(SiSe):分布于钾化-硅化带(KSi)外缘,二者之间无明显界线,在过渡部位呈叠加和穿插关系。该带基本上与铜矿化带相对应,靠近中心部位构成矿体。热液蚀变主要有硅化、绢云母化和黄铁矿化。蚀变矿物总量约30%以上,黄铜矿、黄铁矿呈不规则状,与硅化形成的石英紧密产

出,表明黄铜矿、黄铁矿为硅化的产物。

矿区绢英岩化有两种表现形式:1)钾长石在热液蚀变作用下形成;2)由热液带入 K^+ 交代斜长石形成绢云母和石英,并产出黄铁矿。在该带由内到外铜矿化微弱,直至无矿化。

该带中绢云母化、硅化相伴发生,钾化作用被逐渐取代。原岩中的斜长石和钾长石均不同程度地被绢云母和石英交代,但保留有假象。石英斑晶往往发生次生加大现象,黑云母全部褪色。这样形成的蚀变岩——绢英岩化石英闪长玢岩、石英二长斑岩的矿物成分主要为绢云母和石英,并贯穿有大量金属硫化物细网脉。

本带是矿区的含矿部位之一,主要有黄铁矿化和黄铜矿化。黄铜矿化不均匀,品位比较低(0.2%~0.5%),靠近钾硅化带一侧具面型矿化,形成较厚大的工业矿体,铜多呈细脉状及浸染状分布。边部具“线型”矿化,形成大脉状矿体。

钾化-硅化和绢英岩化是构成斑岩型细脉浸染状矿体的必要条件,两者总是相伴产出,矿化和蚀变均呈渐变过渡关系,由于岩体发生多期次的构造热液事件,岩石中原生造岩矿物为次生蚀变矿物交代,次生蚀变矿物又被更晚期的蚀变矿物交代。故硅化-钾化带中有绢英岩化蚀变矿物产出,绢英岩化带中亦有硅化-钾化。由于温度、压力、pH值、Eh值的改变,金属硫化物沉淀于蚀变矿物周围,形成黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿矿化。矿化呈细脉状或细脉浸染状分布,在硅化-钾化带和绢英岩化带中富集成矿,并伴有金矿化。

(4) 青磐岩化带:主要发育在远离蚀变中心的石英闪长玢岩中,蚀变范围分布广,强度弱。表现为长石、角闪石和黑云母被绿泥石、绿帘石、钠黝帘石和碳酸盐所交代;也有叠加在其他蚀变带上,使蚀变中心矿化增强。石英二长斑岩和花岗闪长斑岩中虽有斜长石、角闪石和黑云母被绿泥石和绿帘石交代的现象,但分布范围有限。由于铜矿物已向硅化钾化带及绢英岩化带中富集,该带中基本无铜矿化,局部有脉状、细脉状铅-锌矿化和弱黄铁矿化。

综上所述,矿化体具典型的“斑岩型”蚀变分带,面型蚀变表现为由斑岩体核部向外依次为强硅化带—硅化钾化带—靠外侧的绢英岩化带,并依次产出筒状—条带状—大脉状矿体。硅化-钾化带蚀变最强是矿区铜品位最好的区域,矿化型式相应出现“面型”-“线型”-“稀疏细脉或星点状”矿化,金属矿物组合为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿-黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿-黄铁矿。

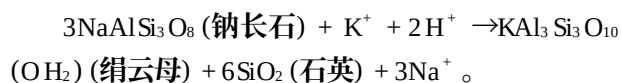
3.1.2 围岩的热液蚀变 围岩图姆沟组(T₃t)火山碎屑-沉积岩,分布有范围宽广的蚀变晕(是岩体范围的2~3倍)。安山岩蚀变为浅灰绿色的青磐岩,粉砂质绢云板岩和变质砂岩等多形成角岩,并局部发育铜矿化和铅-锌矿化。围岩蚀变组合有是硅化、绿泥石化和钠黝帘石化等。

笔者认为围岩蚀变受格咱区域断裂频繁活动的影响,发生了多期次、多阶段的热液构造事件。裂隙中均为金属硫化物、方解石、石英等脉状矿物所胶结充填(图版4)。后期的构造热液事件打开封闭的裂隙,成为热液运行的裂隙网络系统。热液构造事件的反复进行,形成了蚀变作用多阶段、多期次的叠加现象,并导致前期改造过的蚀变矿物再次被改造,使Cu、Au、Mo等金属硫化物并富集,形成铜(钼)矿体。

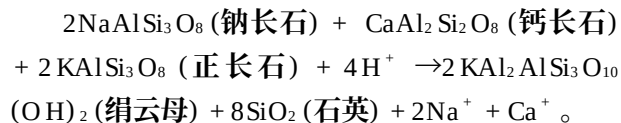
3.2 围岩蚀变的化学反应过程

现结合实际(岩矿分析中得到验证)情况,列举蚀变反应。

(1) 硅化:如果反应物仅为钠长石,反应式为:



如果反应物为钠长石、钙长石和钾长石,则为:



可见硅化常与绢云母化共生。

(2) 钾化:碱性长石间本来就存在着相互替代关系: $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Na}^+ \rightleftharpoons \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{K}^+$ 。热液中强度不同盐基的活度,决定于溶液的酸碱动态,溶液酸碱性的增加,会引起较弱盐基比较强盐基相对活度的增加,使较强盐基被较弱盐基所取代。

以上反应中Na与K相比是较弱的盐基,所以热液中总酸度的增加,Na的活度应比K相对增高,就相应地发生钠长石化;反之碱度增加,K的活度比Na的活度相对增高,就发生微斜长石化。同理,钙长石也可以被K取代而形成钾化; $\text{CaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{K}^+ \rightleftharpoons 2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Ca}^{2+}$ 。反应的实质就是一种去钙作用。

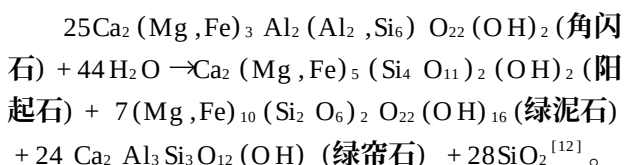
(3) 绢云母化:有两种表现形式。一种形式实质上是氢的交代作用, H^+ 被加入到蚀变矿物中,释放出相应的碱金属阳离子,溶液中的 OH^- 与H的浓度改变。水解作用的产物为含水或 OH^- 的矿物: $3\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}_2) + 2\text{K}^+ + 6\text{SiO}_2$ 。另一种形式是由热液带入 K^+ 交代斜长石,形成绢云母和石英,并有黄铁矿产出: $3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

(钠长石) + $\text{K}^+ + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}_2)$ (绢云母) + 6SiO_2 (石英) + 3Na^+ 。

绢云母化时会有黄铁矿生成: $2\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{Fe}^{2+} + 4\text{H}^+$ 。

黄铁矿在岩体中较为发育,暗色矿物蚀变,使热液中 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 浓度增高,只要遇到 S^{2-} 就强烈的倾向生成黄铁矿。其中 S^{2-} 来源于热液;而 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} ,则是一部分来源于热液,一部分是由暗色矿物蚀变分解释放出来的。

(4) 青磐岩化:表现为角闪石和黑云母被绿泥石、绿帘石、钠黝帘石和碳酸盐等交代。角闪石的绿泥石化:



黑云母绿泥石化是黑云母的 H^+ 与其他阳离子交换形成绿泥石: $2\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (黑云母) + $4\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (绿泥石) + $2\text{K}^+ + (\text{Mg}, \text{Fe})^{2+} + 3\text{SiO}_2$ 。

碳酸盐化主要表现为绢云母的碳酸盐化: $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (绢云母) + $2\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{K}^+ + 3\text{Al}(\text{OH})_4^- + 2\text{CaCO}_3 + 3\text{SiO}_2$ 。

其次是由于热液中含 Ca^{2+} 和 HCO_3^- ,由于构造开启和温度升高而导致的脱气效应而形成方解石: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。碳酸盐化常形成次生方解石或方解石脉。

粘土化: $2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (高岭石) + 2K^+ 。

3.3 蚀变作用对矿石成分的影响

岩石在矿化蚀变过程中引起矿石主要成分的变化, K_2O 、 Na_2O 、Cu在矿化蚀变过程中的变化最为主要。由表1中可以看出, K_2O 、 Na_2O 、Cu含量变化及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 与Cu的变化具以下特征:从硅化到钾-硅化,Cu与 K_2O 同步增长,蚀变时热液中的部分 K^+ 交代斜长石和角闪石,生成钾长石和黑云母而被固定下来,铜沉淀析出金属硫化物。绢英岩化促成大量金属硫化物沉淀;同时部分钾被固定在绢云母中。自钾化-硅化带至绢英岩化带, Na_2O 被迁移带出, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值升高,而总和下降。绢英岩化至硅化粘土化,由于钾长石大量水解形成粘土矿物, K_2O 大量流失,而 Na_2O 变化不大,表现为 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 K_2O 含量同步降低,铜矿化强度略呈下降趋势。

表 1 普朗含矿斑岩体各蚀变带的 K₂O、Na₂O、Cu、Mo 含量

Table 1 The contents of K₂O、Na₂O、Cu、Mo in the alteration zones of the Pulang porphyry Cu deposit

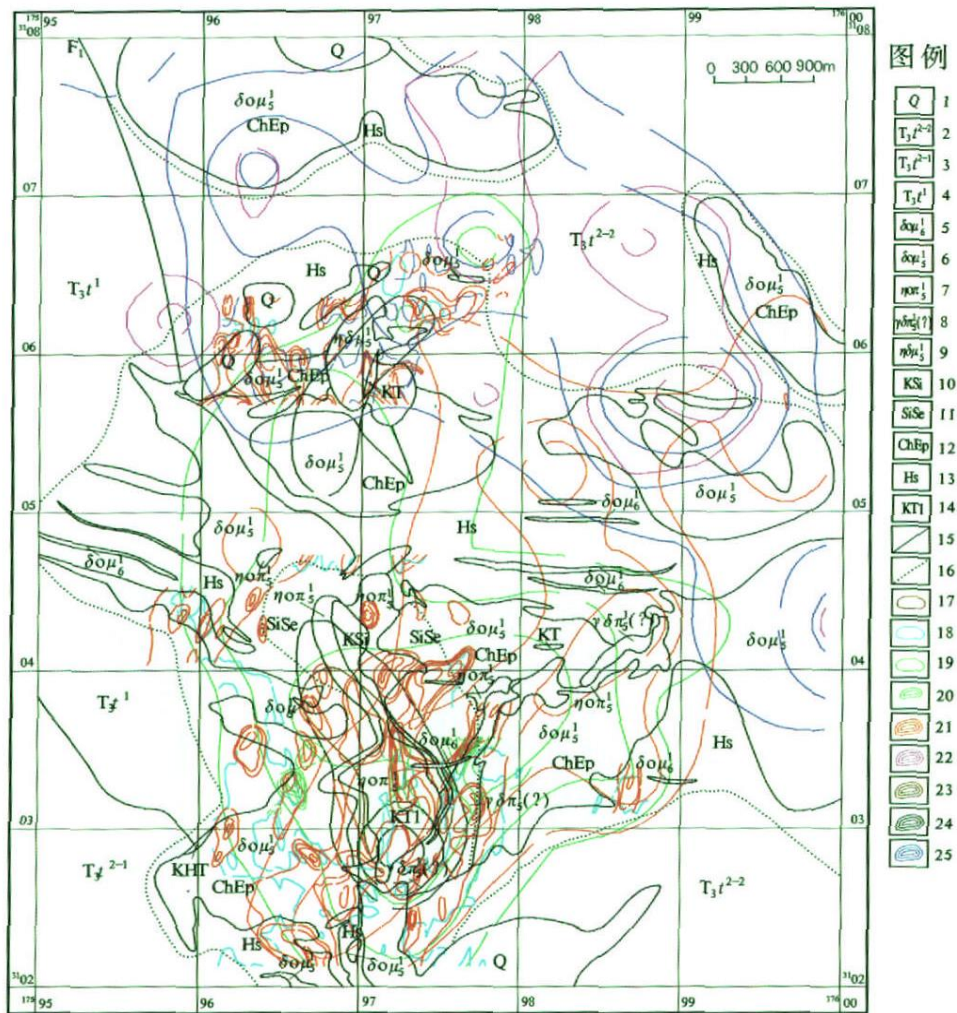
蚀变带	钾硅化带	绢英岩化带	硅化粘土化带	青磐岩化带
样品数	5	3	3	13
K ₂ O (%)	6.24	5.58	3.39	3.45
Na ₂ O (%)	1.91	2.45	3.43	3.33
K ₂ O + Na ₂ O (%)	8.14	8.02	6.82	6.78
K ₂ O/ Na ₂ O	4.56	2.29	1.01	1.21
Cu (%)	0.65	0.34	0.13	0.017

3. 4 围岩蚀变的综合反映

岩石的蚀变分带在物化探由图文可以看出如下特点。综合异常图(图 2)上表现明显的重叠。

由图 2 可以看出如下特点。

(1)岩石地球化学异常:化探异常以 Cu 为主,伴生 W、Mo、Au 等。Cu 异常规模大,不规则长椭圆状,南北长 5 km,平均含量 354×10^{-6} ,最高 2355×10^{-6} ,面积 10.5 km²,规模 37.2 NAP。有三个浓度带。内带 ($> 400 \times 10^{-6}$) 呈不规则等轴状,范围和



1. 第四系;2. 图姆沟组二段二亚段;3. 图姆沟组二段一亚段;4. 图姆沟组一段;5. 燕山期石英闪长玢岩;6. 印支期石英闪长玢岩;7. 印支期石英二长斑岩;8. 印支期花岗闪长斑岩;9. 印支期二长闪长玢岩;10. 钾化-硅化带;11. 绢英岩化带;12. 青磐岩化带;13. 角岩化带;14. 矿体及编号;15. 岩性界线;16. 蚀变带界线;17. MS 等值线;18. PS 等值线;19. ΔT 等值线;20. Cu 浓度等值线;21. Au 浓度等值线;22. Zn 浓度等值线;23. W 浓度等值线;24. Mo 浓度等值线;25. Pb 浓度等值线

1. quaternary system;2. Two sub-paragraph the second member of Tum formation;3 One sub-paragraph the second member of Tum formation;4 the first member of Tum-formation;5. Quartz diorite porphyry dykes in YanShan epoch;6. Quartz diorite porphyry dykes in Indo Chinese epoch;7. Quartz monzonite porphyry in Indo Chinese epoch;8. Granodiorite porphyry i in Indo Chinese epoch;9. two diorite porphyry in Indo Chinese epoch;10. K of silicified zone;11. Silicified sericite zone;12. Plate rocks of Green Belt;13. Rock-based band;14. Ore body and number;15. Lithologic boundary;16. Boundary alteration;17. MS-isopleth;18. PS-isopleth;19. ΔT -isopleth;20. Cu-concentration isopleth;21. Au-concentration isopleth;22. Znr-concentration isopleth;23. W- concentration isopleth;24. Mor-concentration isopleth;25. Pbr-concentration isopleth

图 2 普朗铜矿区地质与物化探综合异常略图

Fig. 2 The sketch map of the integrated geological , geophysical , and geochemical anomalies in the Pulang Cu Deposit

位置与已知 KT1、KT3、KT6 号矿体位置基本吻合; 中带 ($> 200 \times 10^{-6}$) 反映矿化范围, 外带 ($> 100 \times 10^{-6}$) 基本与矿化蚀变范围相似。

(2) 土壤地球化学异常: 矿区有明显的 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 等元素的土壤地球化学异常。Cu 异常一般为 $(100 \sim 400) \times 10^{-6}$, 最高达 2355×10^{-6} ; Mo 异常为 $(5 \sim 40) \times 10^{-6}$; Pb、Zn 为 $(100 \sim 800) \times 10^{-6}$ 。异常组合通常有较明显的水平分带性。Mo、Cu 异常位于内带, 对应于含矿岩体或矿(化)体, 叠置 Mo 异常的 200×10^{-6} 以上的 Cu 异常与矿体吻合。Pb、Zn 异常位于外带, 与外接触带相对应。

从化探异常和土壤地球化学异常看, Cu 异常规模较大、元素组合简单, 梯度变化有序, 具同心浓集, 有明显水平分带。铜、钼异常套合好, 浓集中心明显。由内到外, 异常渐变弱。

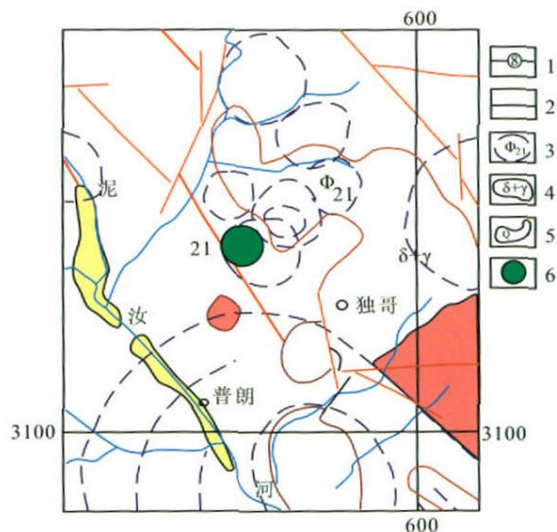
(3) 激电异常: 矿区共圈定 22 个激电异常 ($MS \geq 0$ ms)。形态各异或成群、成带或孤立状, 总趋势围绕矿化斑岩体及其蚀变带呈环带状展布。具中-强的视极化率和较低视电阻率的激电异常, 通常 Ms 值为 $8.90\% \sim 21.70\%$, ρ_s 为 $29.00\% \sim 103.00\% \Omega \cdot m$ 。

(4) 磁异常: 矿区处于南北向展布, 正负相伴的磁异常带上。异常值为 $0 \sim 22$ nT, 极大值为 43.2 nT。矿区中部 [1:1 万磁测 (ΔT) 仅作 15.80 km^2] 有 3 个磁异常: CT1 与 (激电异常 DHJ5)、CT2 与 KT1 露头 (激电异常 DHJ12-1)、CT3 与 (激电异常 DHJ11-6) 分布重叠。表明高精度磁测 (ΔT) 能指示磁性较弱的铜(铁)矿(化)体。在含矿斑岩体内的矿化体部位, 往往出现一圈弱磁异常。

总体上普朗铜矿物化探异常与围岩蚀变分带存在着本质的联系。物化探测量表明, 矿区具典型斑岩型铜矿的地球化学、地球物理特征, 宏观上只有一个矿化蚀变中心, 并叠置有较好的激电异常、磁异常和化探异常。

(5) 遥感异常: 中甸地区遥感影像显示格咱断裂东侧, 中甸岛弧南段环块构造发育, 由多个环状、块状构造, 环块构造内又有大量的同心多层环、对环、卫星式套叠环和菱网状多边形环块; 环块状构造与多边形菱网状构造相互叠加, 组成花边状环块构造带。其中普朗对环(图 3) 为岩浆环块状构造。

普朗矿区围岩蚀变地质特征与遥感异常特征相关性较好, 蚀变遥感异常以羟基异常为主, 多处出现羟基异常多级浓集中心。一、二级羟基异常均落在第四系冰碛物区; 2004~2005 年经钻探证实, 蚀



1. 遥感解译 II 级断裂及编号; 2. 遥感解译线性构造或大型节理带; 3. 遥感解译热事件环及编号; 4. 遥感解译出露地表岩体; 5. 遥感解译第四系; 6. 普朗铜矿

1. Remote sensing interpretation of fracture and number of grade III; 2. Remote sensing interpretation of linear structure or large joints with; 3. Interpretation of remote sensing thermal event loop and number of rings; 4. Interpretation of remote sensing of surface rock outcrops; 5. Remote sensing interpretation of Quaternary; 6. Pulang Copper

图 3 普朗铜矿区遥感线环组合异常图

Fig 3 The remote sensing anomaly map of Pulang Cu ore field

变遥感异常中心为矿体主体部位。一、二级羟基异常位于硅化钾化带和石英二长斑岩内; 三级羟基异常位于西南侧。北西向铁染异常落在黄铁绢英岩化带和花岗闪长斑岩中。蚀变遥感异常呈北西向展布, 与矿体走向一致。羟基蚀变遥感异常指示与斑岩体有关的硅化-钾化蚀变及(黄铁)绢英岩化蚀变, 相伴生的铁染异常为次要标志, 是黄铁绢英岩化带中黄铁矿化的反映。

普朗矿区总体处于北西向构造与东西向构造相交的构造背景上, 矿床产出由北西向普朗河构造与东侧一组平行的北西向构造夹持部位, 且处于北西普朗河构造与北东向构造交汇的东侧, 多个岩浆热液环叠置的热事件环结部位(图 3)。表明北西、东西向构造控制了成、岩控矿环境。矿体严格受北西向普朗河断裂与北东向构造控制, 为多期岩浆热液活动作用、矿液多次富集所致, 矿化与复式岩体关系密切。可见, 线环构造组合作为地质背景和矿化事件的真实反映, 对矿化富集、矿体产出具控制作用。

综上所述, 强度大、面积广的多级羟基异常浓集中心与不同方向构造交汇背景下多个岩浆热液环叠置的热事件环结部位是斑岩型铜矿构造和围岩蚀变

规律的表现。

4 围岩蚀变的组合及成矿年龄

由上述分析可知,在几个蚀变分带中,同种岩石内有几种不同的蚀变,不同的岩石内有相同或不同的多种蚀变并存。蚀变不是单独出现,而是以叠加方式产出,显示热液蚀变作用的继承性。原生矿物多数仅以斑晶假象存在,并为晚期矿物所交代,晚期矿物被更晚期蚀变矿物交代,从而揭示了本区成矿的本质,即热液蚀变作用的多期性和继承性,导致多种蚀变的叠加和 Cu、Mo、Au 等有用元素的多期矿化富集。

含矿岩体蚀变中心,以硅化为主,伴有钾化和绢云母化作用,硅化使 Mo 富集成矿,并伴随有少量黄铜矿和黄铁矿等(图版 4)。

钾化-硅化带主要有钾长石化、黑云母化和硅化,其次有绢云母化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化、钠黝帘石化和碳酸盐化等;这种多种蚀变组合使 Cu、Mo、Au 等富集成矿,形成厚大的矿体。且这么多蚀变是漫长的多期次、多阶段中叠加的结果。

绢英岩化带的蚀变组合主要为硅化、绢云母化、黄铁矿化,其次有钾化、青磐岩化和碳酸盐化。靠近蚀变中心也形成较强的铜矿化。绢英岩化带有较强的黄铁矿化,因此也称黄铁绢英岩化。

青磐岩化带中的蚀变组合主要为绿泥石化、绿帘石化、钠黝帘石化和碳酸盐化,伴有硅化、黄铁矿化,并在局部地方形成小规模或不成规模的铅、锌矿体或矿化体。

资料表明,普朗斑岩铜矿钾硅酸盐化的黑云石英二长斑岩成矿作用时间大致为 $(235.4 \pm 2.4) \sim (221.5 \pm 2.0)$ Ma,石英-辉钼矿阶段的辉钼矿 Re-Os 年龄大致为 (213 ± 3.8) Ma。两者十分相近,成

矿作用完成于印支期。但主矿体钾长石 $K-Ar$ 年龄暗示热液活动持续到 (182.5 ± 1.8) Ma,说明与斑岩铜矿有关的热液系统延续 40 Ma 之久;这是高品位大规模斑岩铜矿形成的必要条件之一,也是围岩蚀变作用在该矿区持续、漫长的历史佐证。

5 蚀变作用对矿石结构、构造的影响

矿强蚀变作用决定了矿石的结构、构造。矿石的结构有结晶结构、交代结构和压力结构,而以前二者为主,其中又以结晶结构中的他形晶结构、交代结构中的交代溶蚀结构最为发育(表 2)。

表 2 普朗铜矿的矿石结构

Table 2 Classification of the Pulang copper ore structures				
结构类型	结晶结构	交代结构	压力结构	表生结构
主 要	他形晶结构	交代溶蚀结构		
次 要	包含结构、半自形晶结构	交代残余结构		隐晶结构、胶状结构
少 见			压碎结构	

结晶结构以他形晶结构为主。绝大多数黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、磁黄铁矿、紫硫镍矿、磁铁矿、赤铁矿及部分黄铁矿为呈他形晶结构。黄铜矿集合体以浸染状、细脉浸染状和细脉状产出(图版 5)。

包含结构中见黄铁矿和黄铜矿共生,常见半自形粒状的黄铁矿被黄铜矿包裹(图版 6、图版 7)。

交代结构有交代溶蚀结构和交代残余结构。

矿石的构造一般较简单,硫化矿石以细脉浸染状构造为主要,其次为浸染状构造和脉状构造,角砾状构造、斑杂状构造仅局部见到,氧化矿石为鲕粒-豆状构造(表 3)。

表 3 普朗铜矿的矿石构造

Table 3 Classification of the Pulang copper ore constructions

构造类型	亚类名称		成矿方式
	按矿物粒径和脉宽分类	按矿物含量和脉体排列方式分类	
浸染状构造(+)	显微粒浸染状构造(+)、微粒浸染状构造(+)、细粒浸染状构造(++)、中粒浸染状构造(++)、粗粒浸染状构造(+)	星散浸染状构造(+)、稀疏浸染状构造(++)	热液交代为主
脉状构造(+)	微脉状构造(++)、细脉状构造(+)、小脉状构造、大脉状构造	平行脉状构造(+)、交错脉状构造(+)、网脉状构造(++)、复脉状构造(+)	热液充填为主
脉状-浸染状构造(++)	微脉-浸染状构造(++)、细脉-浸染状构造(+)	平行脉-浸染状构造(+)、交错脉-浸染状构造(+)、网脉-浸染状构造(+)、复脉-浸染状构造(+)	热液充填、交代
角砾状构造 斑杂状构造 鲕状-豆状构造(++)			热液蚀变交代作用 热液交代为主 风化作用

注:++为主要,+为次要

6 结 论

(1) 普朗铜矿床成矿作用发生于普朗复式斑岩体内,岩石蚀变强烈。多种围岩蚀变呈面型产出,具典型的“斑岩型”蚀变分带。

(2) 多期次、多阶段的构造-热液事件,形成矿区多种节理、裂隙和微裂隙系统,导致多期次、多种蚀变的叠加和矿化。

(3) 围岩蚀变与物、化探异常和遥感异常之间存在着本质的联系,是找矿与勘查的直接标志和指导工程施工的依据。

致 谢:本文得到云南省地质调查局正高级工程师的指导,并引用了多年来在该矿区工作和勘查人员的成果,在此一并致谢!

参考文献 (References):

- [1] 侯增谦,曲晓明,周继荣,杨岳清,黄典豪,吕庆田,唐绍华,余金杰,王海平,赵金花. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程:花岗岩记录[J]. 地质学报, 2001, 75(4): 484 - 497.
Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, Yang Yueqing, Huang Dianhao, L ũ Qingtian, Tang Shaohua, Yu Jinjie, Wang Haiping, Zhao Jinhua. Collision-Orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(4): 484 - 497. (in Chinese with English abstract)
- [2] 侯增谦,杨岳清,曲晓明,黄典豪,吕庆田,王海平,余金杰,唐绍华. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 110 - 119.
Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, Huang Dianhao, L ũ Qingtian, Wang Haiping, Yu Jinjie, Tang Shaohua. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 110 - 119. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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, 2007, 8(11): 436 - 446.
Li Wenchang, Zeng Pushen. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan[J]. Journal of Chengdu University of Thchnology (Science & Technology Edition), 2007, 8(11): 436 - 446. (in Chinese with English abstract)
- [4] 曾普胜,莫宣学,喻学惠,侯增谦,徐启东,王海平,李红,杨朝志. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 394 - 400.
Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Hou Zengqian, Xu Qidong, Wang Haping, Li Hong, Yang Chaozhi. Porphyries and porphyry copper deposit in Zhongdian area, northwestern Yunnan[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 394 - 400. (in Chinese with English abstract)
- [5] 曾普胜,李文昌,王海平,李红. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床:岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 989 - 1000.
Zeng Pusheng, Li Wenchang, Wang Haiping, Li Hong. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(4): 989 - 1000. (in Chinese with English abstract)
- [6] 谭康华,李光军,黄定柱,张世权. 普朗大型斑岩铜矿控矿条件[J]. 云南地质, 2005, 24(2): 167 - 174.
Tan Kanghua, LI Guangjun, Huang Dingzhu, Zhang Shiquan. The Ore-controlling conditions of Large scale pulang porphyry copper deposit[J]. Yunnan Geology, 2005, 24(2): 167 - 174. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李光军,谭康华,张世权,黄定柱,孟青. 普朗铜矿找矿标志及找矿模型[J]. 云南地质, 2005, 24(2): 174 - 185.
Li Guangjun, Tan Kanghua, Zhang Shiquan, Huang Dingzhu, Meng Qing. The Ore-Prospecting index and model of pulang Cu deposit, xianggelila[J]. Yunnan Geology, 2005, 24(2): 174 - 185. (in Chinese with English abstract)
- [8] 云南省地质调查局. 西南三江地区云南段重大找矿疑难问题研究[R]. 2009.
Yunnan Geological Survey, Study on major problems of Geological prospecting in Yunnan section along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area in southwestern China[R]. 2009. (in Chinese)
- [9] 杜杨松,庞振山,等. 云南省普朗铜矿成矿规律与成矿预测研究[R]. 2007.
Du Yangsong, Pang Zhenshan, et al. Metallogenic regularities and predictions of Pulang copper deposit, Yunnan[R]. 2007. (in Chinese)
- [10] 尹光候,刘星,邓志祥,肖玲. 云南中甸五村-移山晚三叠世沉积及盆地特征[J]. 云南地质, 2005, 24(1): 58 - 66.
Yin Guanghou, Liu Xing, Deng Zhixiang, Xiao Ling. Analysis of the Late Triassic sediment and basin of Wucun-Yishan area in Zhongdian, Yunnan[J]. 2005, 24(1): 58 - 66. (in Chinese with English abstract)
- [11] 连长云,章革,元春华. 短波红外光普矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 621 - 637.
Lian Changyun, Zhang Ge, Yuan Chunhua. Short-wave infrared measurement technology in the S & P minerals Pulang porphyry copper deposit, hydrothermal alteration mineral mapping of application[J]. Geology of Mineral Deposits, 2005, 24(6): 621 - 637. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘斌. 地壳构造流体[M]. 北京:科学出版社, 2008: 6.
Liu Bin. Tectonic fluid[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6. (in Chinese)