

文章编号:0258-7106(2005)06-0621-17

# 短波红外光谱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\*

连长云<sup>1</sup>,章 革<sup>2</sup>,元春华<sup>1</sup>

(1 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;2 中国地质大学,北京 100083)

**摘 要** 利用便携式短波红外光谱测量仪(PIMA)在云南普朗斑岩铜矿区开展了短波红外光谱测量工作,通过系统的野外数据采集,获得了研究区蚀变矿物组合及主要蚀变矿物的分布,并建立了普朗斑岩铜矿区蚀变矿物分带模式。在此基础上,建立了斑岩铜矿床找矿模型,该模型对普朗铜矿区及其外围的找矿工作具有积极的指导意义。

**关键词** 地质学;短波红外光谱矿物测量技术;PIMA;蚀变矿物;普朗;云南

**中图分类号**: P618.41;P627

**文献标识码**: A

短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术是近年来发展起来并逐步成熟的一种应用于光谱矿物测量的遥感技术,是由高光谱遥感技术发展而来的。目前,技术上可行并常用的高光谱技术可探测波长区间大致为400~2500 nm,包括了整个可见光区(400~700 nm)和习惯上所称的近红外区(700~1100 nm)与短波红外区(1100~2500 nm)。在该波长范围内,地表的植物主要反映在可见光区,而岩石中含水或含氢氧根的矿物(主要为层状硅酸盐和粘土类)以及硫酸盐和碳酸盐矿物则在短波红外区有特殊显示。因为这些矿物大多出现在与金属矿床有关的热液蚀变带中,故该技术可用于指示热液成矿体系的环境参数,提供找矿线索并指导找矿。

短波红外(SWIR)光谱矿物测量技术一般采用的波长范围为1300~2500 nm,即大致位于短波红外区。目前,这种技术已经成熟并走向商业化,澳大利亚生产的便携式短波红外光谱矿物测量仪(Portable Infrared Mineral Analyzer,以下简称PIMA)是目前使用最广泛的测量仪。

20世纪90年代以来,PIMA已广泛地应用于矿产勘查领域,特别是澳大利亚、美国、加拿大、南非、智利和欧洲的许多矿业公司,已将PIMA测量作为一种常用的勘查手段。通过对矿物种类、丰度和成分的识别,特别是与成矿作用密切相关的蚀变矿物

的识别,PIMA测量可有效地圈定热液矿化蚀变带,定量或半定量地估计被测区域的蚀变强度和蚀变矿物含量,给出成矿作用规模和强度等(Crowley,1999;Denniss et al.,1999;Passos et al.,1999;浦瑞良等,2000;Yang et al.,1999;2001)。在辅助勘查决策方面,PIMA测量也能提供独特的信息。

2001年,中国地质调查局购进了澳大利亚先进的PIMA,旨在通过对典型矿区开展近红外光谱矿物填图试验和示范,建立高光谱探测技术找矿工作的技术流程,提高中国矿产资源调查、评价工作的水平。同年,中国地质调查局发展研究中心在新疆土屋斑岩铜矿区利用PIMA开展了示范研究,取得了很好的效果。2002年,笔者等在云南普朗斑岩铜矿区又开展了类似的工作,本文将此次工作的具体方案、工作方法及取得的结果叙述如下,旨在应用蚀变矿物组合,结合其他勘探数据,指导矿区的勘探部署工作。

## 1 普朗斑岩铜矿区地质特征

普朗斑岩铜矿床位于云南省中甸地区(现称香格里拉),是一处新近发现和勘查的具有超大型远景的铜矿床(杨岳清等,2002;云南省地质矿产局,1990;曾普胜等,1999;2003)。矿床位于中甸县县城

\* 本文得到中国地质调查局重点项目“成像光谱和便携式近红外光谱填图应用试验研究”(200210000006)的资助  
第一作者简介 连长云,男,1965年生,副研究员,长期从事地球化学和矿产资源评价研究工作。  
收稿日期 2005-02-01;改回日期 2005-04-29;张绮玲编辑。

北东 42° 方向 36 km 处,行政上隶属香格里拉藏族自治州格咱乡。

### 1.1 区域地质

区域上,普朗斑岩铜矿区位于红山复式背斜南段东翼的次级黑水塘-牙树背斜中,出露地层主要为上三叠统图姆沟组二、三段( $T_3 t^{2-3}$ )的板岩夹安山岩、砂岩及曲嘎寺组三段( $T_3 q^3$ )的灰岩、大理岩夹砂板岩。北西向的普朗河断裂和北东东向的力中全达主干断裂控制了普朗岩体的展布。普朗复式岩体呈不规则状出露于地表,面积约 9 km<sup>2</sup>,岩性主要为黑云石英闪长玢岩、黑云石英二长斑岩和闪长玢岩。

目前,普朗斑岩铜矿区已发现 14 个含矿斑岩体,这些斑岩体的地表露头面积大于 40 km<sup>2</sup>,其中在普朗、松诺、卓玛等中酸性斑岩体内,圈出了工业铜矿体。普朗斑岩铜矿体的工程控制厚度达数百米,平均铜品位近 1%。

### 1.2 矿床地质

普朗铜矿区出露的岩体以石英闪长玢岩为主,后期的石英二长斑岩及花岗斑岩又侵入到石英闪长玢岩中。它们与更晚期的脉状闪长玢岩组成一复式岩体。复式岩体以 1 号矿体附近为中心,由内向外,大致可划分出钾化硅化带→黄铁绢英岩化带→青磐岩化带,矿化主要与钾化、硅化、绢云母化等蚀变有关(图 1)。整个岩体呈北西向展布,向北东陡倾。

工程揭露控制 3 个矿化体,矿化体的面积分别为 0.85 km<sup>2</sup>、0.24 km<sup>2</sup> 和 0.13 km<sup>2</sup>。探槽、钻孔控制 4 个矿体,其中 1 号矿体长 600 m,宽 500 m,厚 69.89 ~ 289.20 m,Cu 品位( $w_B$ ,下同)0.1% ~ 1.74%,平均 0.58%,伴生 Au 品位 0.08 ~ 0.25 g/t,平均 0.15 g/t;2 号矿体长 900 m,宽 6 ~ 60 m,Cu 品位 0.2% ~ 1.4%,平均 0.47%;3 号矿体厚 35 m,Cu 品位( $w_B$ ,下同)0.1% ~ 0.74%,平均 0.32%;4 号矿体长大于 300 m,Cu 品位 0.17% ~ 1.90%,平均 0.96%。

以斑岩体为中心,由内向外依次出现钾化硅化带—黄铁绢云母化带—青磐岩化带,矿化型式相应出现面型—线型—稀疏细脉或星点状矿化。金属矿物主要有黄铜矿、斑铜矿(γ)、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、方铅矿等,脉石矿物有石英、长石、黑云母、绿泥石、绢云母。矿石结构为自形-半自形粒状、交代溶蚀、包裹结构等;矿石构造为细脉浸染状、斑块状、网脉状、星点状构造等。

矿石类型按氧化程度分为氧化矿和硫化矿,以后者为主(前者仅极个别地方发育);按含矿岩性分

为石英闪长玢岩型和石英二长斑岩型;按矿石构造分为细脉浸染状铜矿石、稠密浸染状-块状铜矿石、浸染状铜矿石等。

## 2 PI MA SP 简介

PI MA SP 是由澳大利亚 Integrated Spectronics Pty Ltd 公司生产的一种短波红外反射光谱分析仪,它的波长范围为 1 300 ~ 2 500 nm;光谱分辨率 7 ~ 10 nm;光谱取样间距 2 nm;信噪比 1/3500 ~ 1/4500;对于样品和参考物有 32 个识别级别,测量速度 10 s ~ 6 min。

PI MA SP 具有很多优点,包括仪器轻便、测试速度快、无须制样、测量样品类型多样、不需要单独光源和成本低廉等。

PI MA SP 的工作原理是:利用短波红外光照射被测样品,并接收矿物的特征吸收光谱,通过对所获的光谱曲线与标准曲线比对,反演被测样品蚀变矿物信息。具体而言,由于包括羟基、水、碳酸盐以及 Al-OH、Mg-OH 和 Fe-OH 等分子键的矿物对短波红外光十分敏感,当短波红外光照射到这些矿物表面时,就会产生特征的吸收光谱。包含上述分子键的矿物主要有层状硅酸盐(粘土、绿泥石和蛇纹石类矿物)、羟基化硅酸盐(绿帘石和闪石)、硫酸盐(明矾石、黄钾铁矾和石膏)和碳酸盐等蚀变矿物。因此,PI MA SP 主要用于测量上述几类蚀变矿物。

## 3 工作方法

PI MA 测量工作包括野外样品的采集、现场测量和数据处理与解译 3 个密切相关的环节。

### 3.1 样品采集

尽管 PI MA 测量的介质多种多样,但本次工作只采集岩(矿)石样品进行测量。采样原则是,沿已有的勘探线剖面,相隔一定点距采样,一般 3 ~ 5 m,地表和剖面测量分别以探槽和钻孔岩心为对象,尽量使所采样品具有代表性。

在普朗斑岩铜矿区共采集了 9 个钻孔的岩心样品和 2 条地表长剖面的岩石样品。9 个钻孔分别是 PLD001、PLD002、PLD003、ZK0401、ZK0606、ZK0608、ZK0807、ZK1201 和 ZK1203,它们在地表的位置见图 1。共采集岩心样品 927 件。

地表样品的采集主要集中在 0 线和 0' 线上。尽

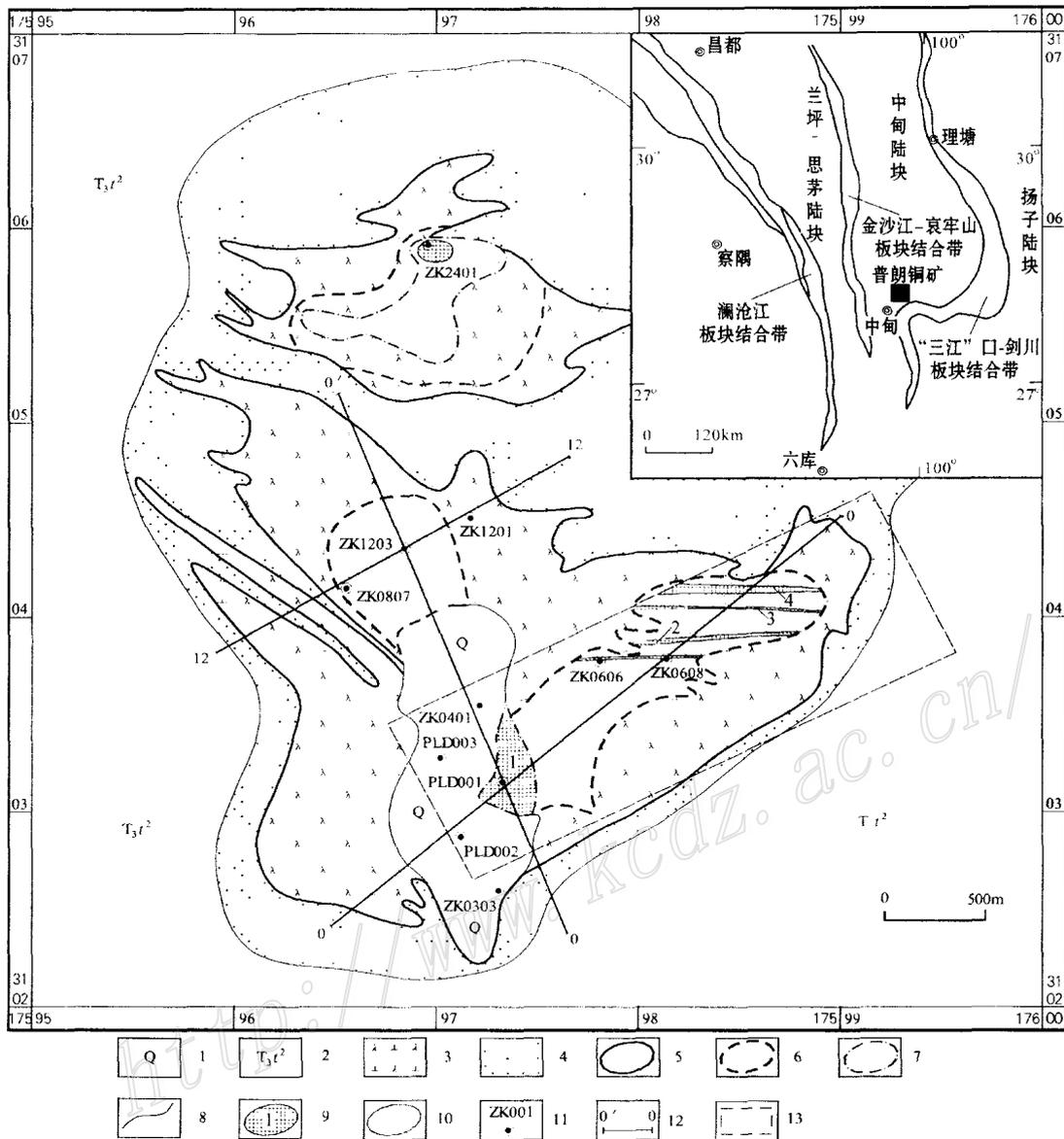


图 1 普朗斑岩铜矿床地质图(云南地调院普朗项目组提供,略有修改)

(大图边框为公里网坐标,以下图同图 1;插图中为经纬度)

- 1—第四纪冰碛物、冲积物、残坡积物;2—三叠纪图姆沟组二段含炭质(砂质)绢云板岩夹安山岩、砂岩;3—石英闪长玢岩;4—角岩化带;
- 5—青磐岩化带;6—绢英岩化带;7—钾化硅化带;8—实测地质界线;9—铜矿体及编号;10—铜矿化体;11—钻孔及编号;
- 12—勘探线剖面及编号;13—“PIMA SPTM”试验工作区

Fig.1 Geological map of the Pulang porphyry Cu deposit in Yunnan Province

( Modified from the Report on the Pulang Porphyry Copper Deposit by Yunnan Institute of Geological Survey)

- 1—Quaternary glacial materials, alluvia, slope materials;2—Triassic Tu mugou sericitized slate intercalated with andesite and sandstone;
- 3—Quartz diorite porphyrite;4—Hornfelsed zone;5—Propylite zone;6—Sericite zone;7—Potassic alteration zone;8—Measured geological boundary;
- 9—Cu orebody and its serial number;10—Cu mineralized body;11—Drill hole and its serial number;
- 12—Exploration line and its serial number;13—Experimental area of “PIMA SPTM”

量从探槽中采样,在未进行工程揭露的地段,从地表露头上采样。共采集样品 356 件。

### 3.2 PIMA 测量

野外采集的绝大多数样品均在野外驻地进行

PIMA 测量,部分样品在采样的现场进行测量。对每一块样品,一般测试 3 个数据。此外,考虑到不同样品的吸收率不同,具体测量时适当调整了样品的测量时间。

### 3.3 数据处理与解译

PI MA 测量获得的是岩石、矿石样品的光谱曲线。如何将光谱曲线解译为对应的蚀变矿物,是数据处理与解译工作的主要任务。PI MA 内储存了大量的蚀变矿物标型谱线,因此,将测量获得的光谱曲线与蚀变矿物标型谱线对比,即可获得所测样品的蚀变矿物种类。

蚀变矿物识别是在 Pi ma View 3.1 软件支持下自动进行的,同时参考矿物特征的吸收谱线。对识别出的蚀变矿物,可将其投影到矿区平面地质图和剖面地质图上。根据蚀变矿物及其组合的空间分布特征,以及它们与矿区岩石、构造、矿体的对应关系,可分析蚀变作用产生的地质特征,总结蚀变与矿化间的关系及规律。

## 4 结果与解释

### 4.1 蚀变矿物种类

PI MA 测试结果表明,地表识别出的蚀变矿物共有 18 种。按出现多少排序为:硬石膏、伊利石、镁绿泥石、多水高岭石(埃洛石)、铁镁绿泥石、角闪石、铁绿泥石、白云母、黑云母、蒙脱石、多硅白云母、阳起石、透闪石、方解石、金云母、白云石、电气石和高岭石。其中主要的蚀变矿物为硬石膏、伊利石、镁绿泥石、多水高岭石、铁镁绿泥石和铁绿泥石。

在钻孔中识别出的蚀变矿物比地表要多一些。按出现多少排序为:伊利石、镁绿泥石、多水高岭石、硬石膏、蒙脱石、黑云母、角闪石、铁镁绿泥石、多硅白云母、白云母、阳起石、金云母、方解石、透闪石、高岭石、绿脱石、铁绿泥石、文石、白云石、菱铁矿、电气石、绿帘石、石膏、水铝石和滑石。主要蚀变矿物包括伊利石、镁绿泥石、多水高岭石、硬石膏、蒙脱石、黑云母(以上为体积分数大于 10%的)和铁镁绿泥石、多硅白云母、白云母、阳起石、金云母(以上为体积分数大于 5%的)。

### 4.2 主要蚀变矿物的分布

#### 4.2.1 伊利石

广义地讲,伊利石属于白云母族,是一种热液系统中常见的矿物。

在普朗铜矿区,伊利石是分布最广泛的蚀变矿物之一。尽管如此,它在地表不同部位和不同钻孔中的分布特征也不尽相同。

地表识别出的伊利石具有以下特征:在 0 线,伊

利石集中分布于 2 个地段:一是 1 号矿体上方及其东侧;二是东部脉状矿体的东北侧。在 PLD002 钻孔(PLD002 为早期勘探工作中使用的钻孔编号,本文沿用此编号。PLD001、PLD003 与此相同)的西南侧则很少;在 0' 线及 12 线东部,伊利石均匀分布。总体上,伊利石以 ZK0608 钻孔为中心呈近环状分布(图 2)。

剖面上,伊利石的分布也具有明显的规律性。在 0 线剖面的 3 个钻孔中,伊利石从 ZK0608 到 PLD001 再到 PLD002 逐渐增多(图 3);而在 0' 线和 12 线,伊利石在各钻孔中的分布则基本均匀,变化不大。

#### 4.2.2 硬石膏

硬石膏是普朗斑岩铜矿区另一种非常普遍的蚀变矿物。它在地表分布最广,在钻孔中也大量出现。

地表识别出的硬石膏在所测的 2 条剖面线上都有分布,且较为均匀(图 4)。因此,至少从地表的分布特征看,硬石膏与地质体或矿体并无明显的对应关系。

在剖面上,硬石膏的变化特征与地表基本相似。无论在 0 线、0' 线还是 12 线,硬石膏在各钻孔中均有分布,只是不如在地表分布广泛(图 5)。地表的硬石膏不排除次生成因,但在钻孔中的硬石膏特别是在较深部位的硬石膏(如 ZK1203 显示的那样)可能是在热液活动的衰退期,由上升的岩浆  $\text{SO}_2$  气体(通常与铜质蚀变有关)与后来下渗的酸性地下水反应形成。这种情况下,硬石膏可以叠加于斑岩成矿系统的高温蚀变产物(如硅化、钾化和黑云母化)之上。

#### 4.2.3 绿泥石

绿泥石在普朗斑岩铜矿区的分布也很广泛。据统计,普朗斑岩铜矿区的绿泥石主要为富镁绿泥石,其次为铁镁绿泥石,此外还有少量铁绿泥石。

富镁绿泥石在普朗斑岩铜矿区地表的分布见图 6。富镁绿泥石集中分布在 1 号矿体的东侧和 ZK1203 附近地区,在矿体上方较少。从剖面上看,0 线剖面自东北向西南,富镁绿泥石逐渐减少(图 7),在 0' 线,自南而北,富镁绿泥石逐渐增多(图 8),而在 12 线,富镁绿泥石在各钻孔中均匀分布。这种分布特征似乎表明富镁绿泥石在空间上有 2 处明显的浓集区,一处位于 ZK0608 附近,另一处位于北部 12 线沿线。

#### 4.2.4 蒙脱石

在普朗铜矿区地表所测试的 2 条剖面中,蒙脱

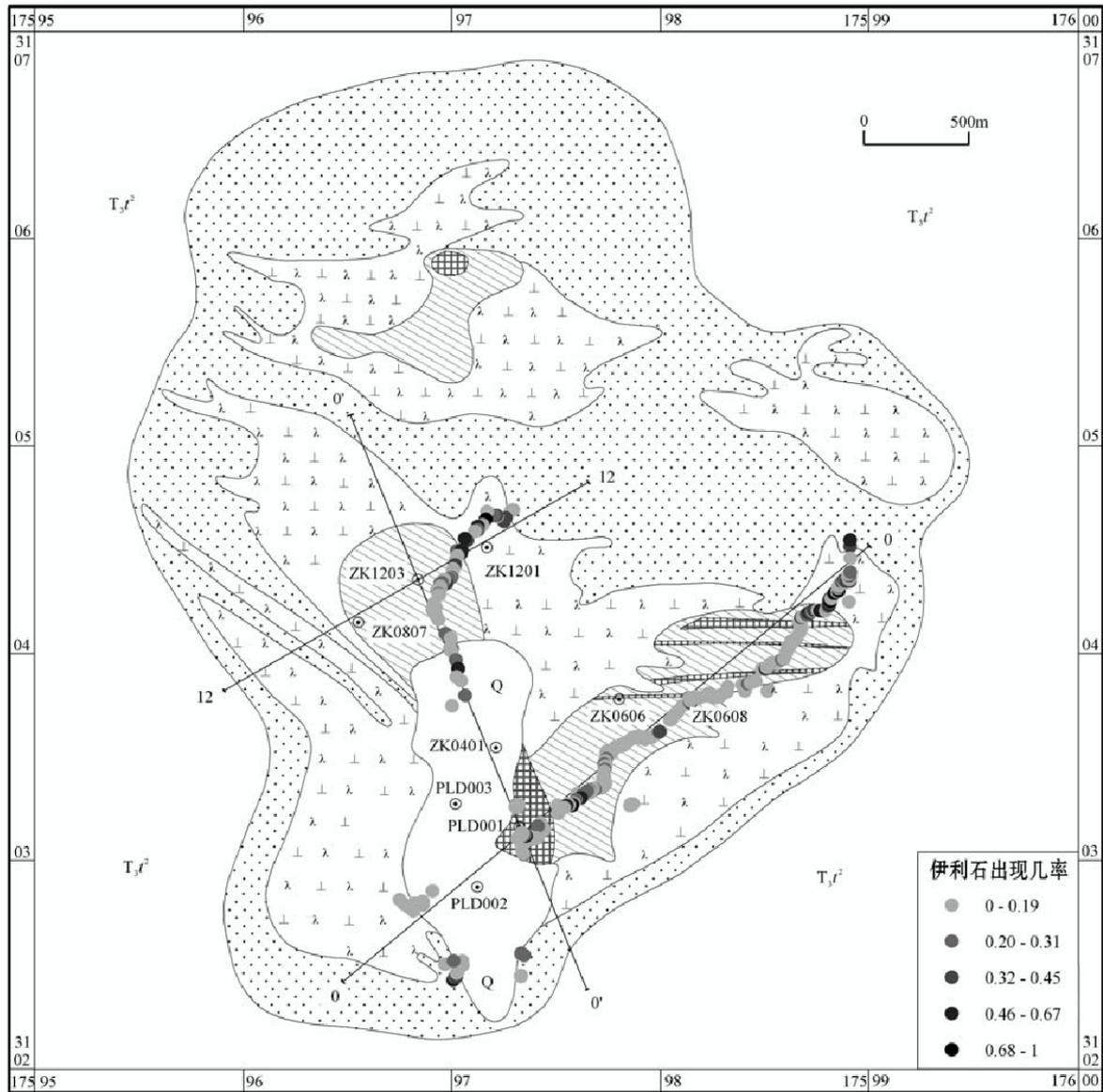


图 2 普朗斑岩铜矿区地表识别出的伊利石分布(底图同图 1)

Fig.2 Distribution of illite at the surface of the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

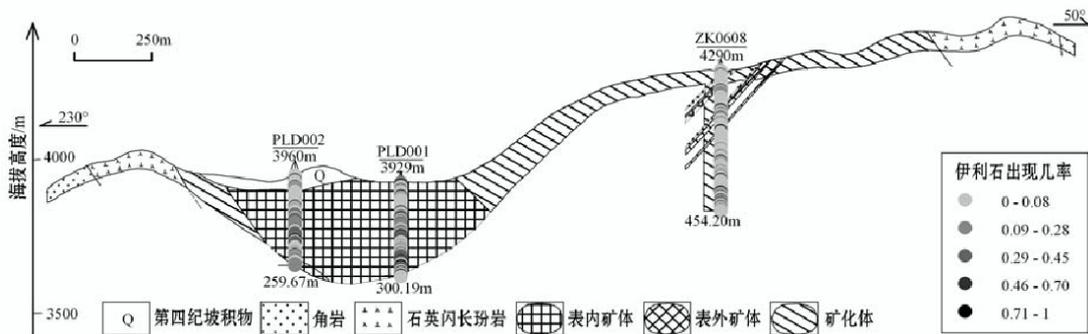


图 3 普朗斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的伊利石分布

Fig.3 Distribution of illite along No. 0 section of the Pulang porphyry copper deposit

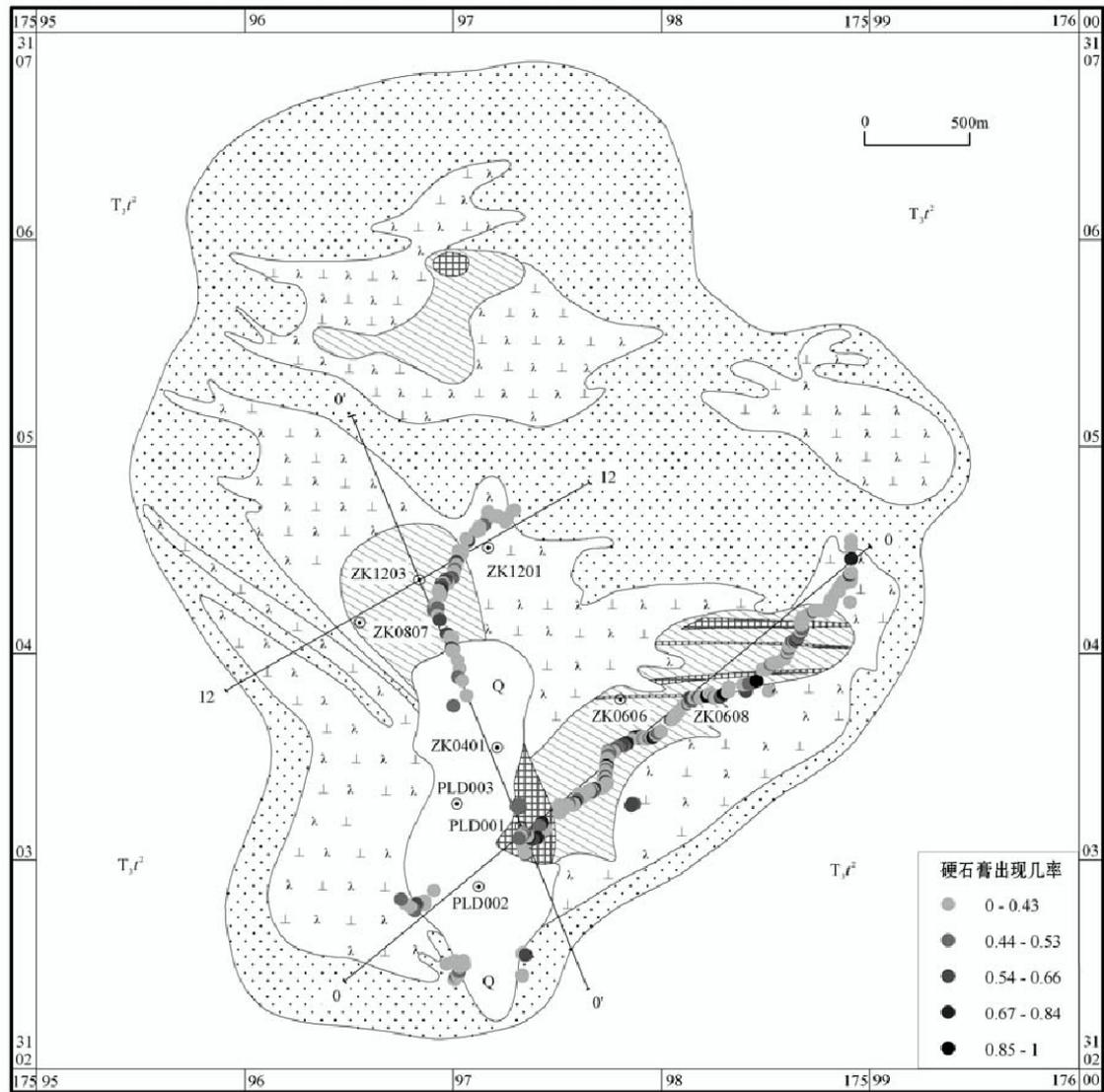


图 4 普朗斑岩铜矿区地表的硬石膏分布(底图同图 1)

Fig.4 Distribution of anhydrite at the surface of the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

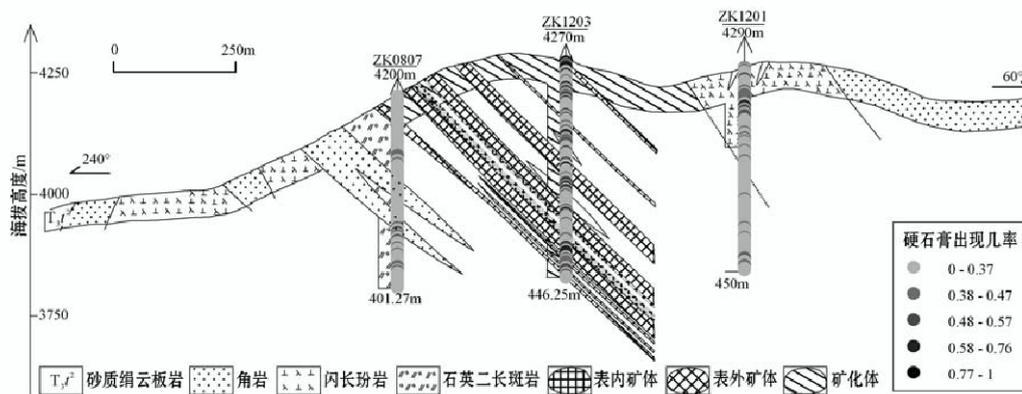


图 5 普朗斑岩铜矿区 12 线剖面识别出的硬石膏分布

Fig.5 Distribution of anhydrite along No.12 section of the Pulang porphyry copper deposit

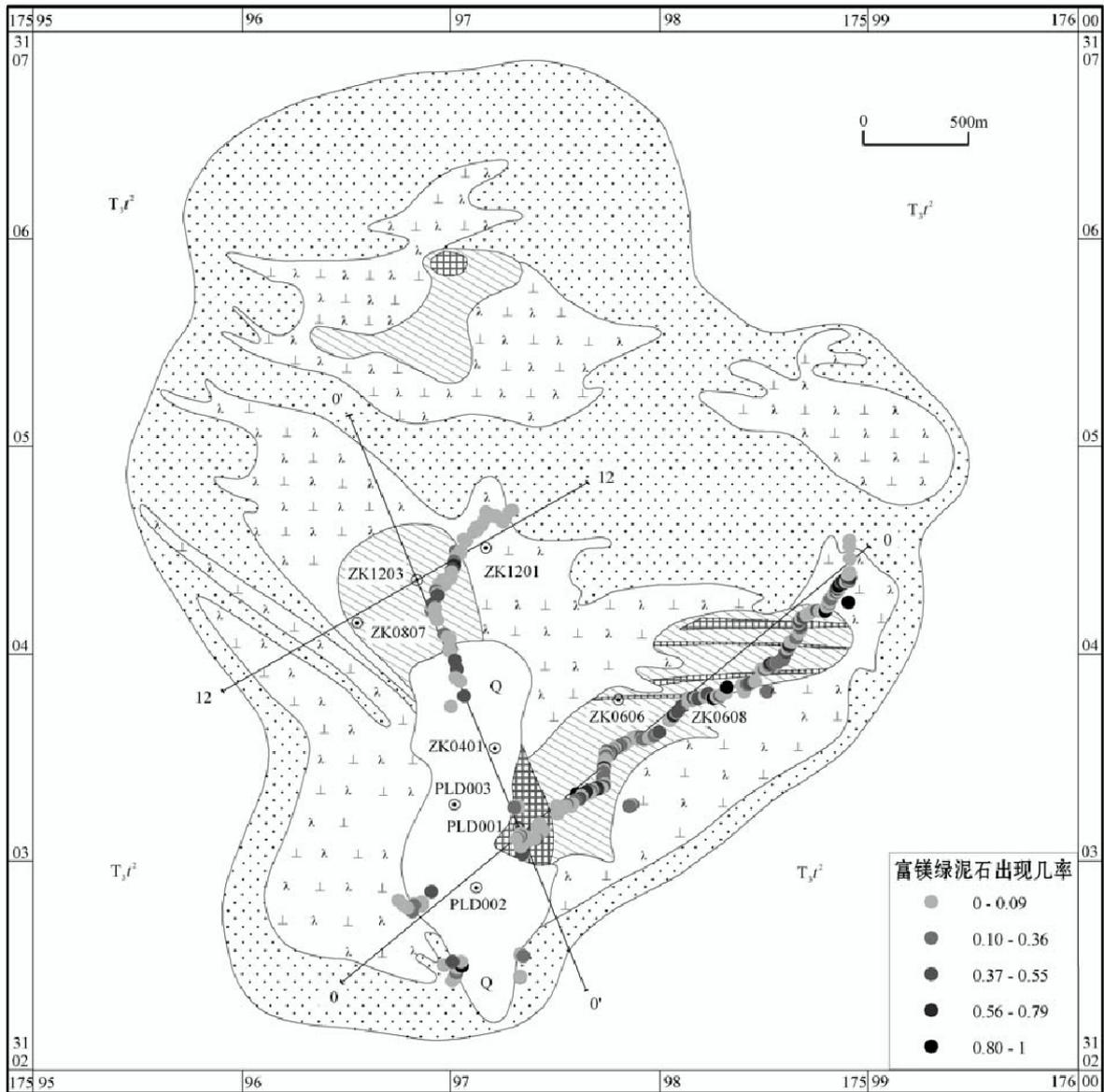


图 6 普朗斑岩铜矿区地表的富镁绿泥石分布(底图同图 1)

Fig.6 Distribution of Mg-rich chlorite at the surface of the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

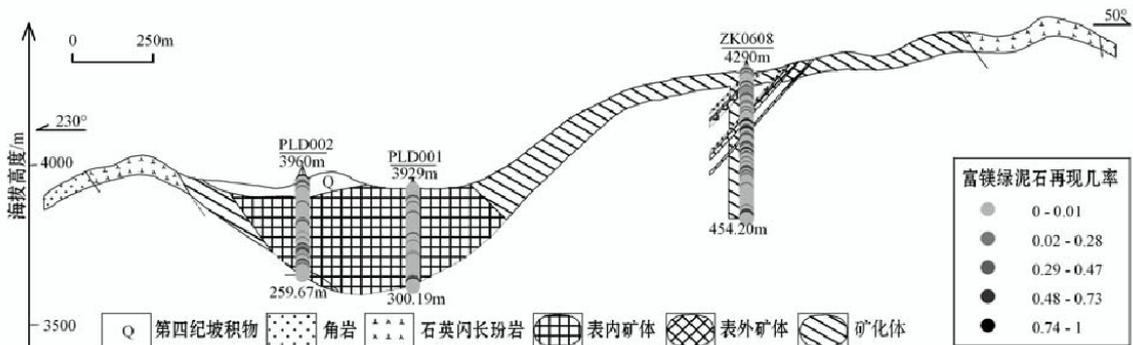


图 7 普朗斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的富镁绿泥石分布

Fig.7 Distribution of Mg-rich chlorite along No. 0 section of the Pulang porphyry copper deposit

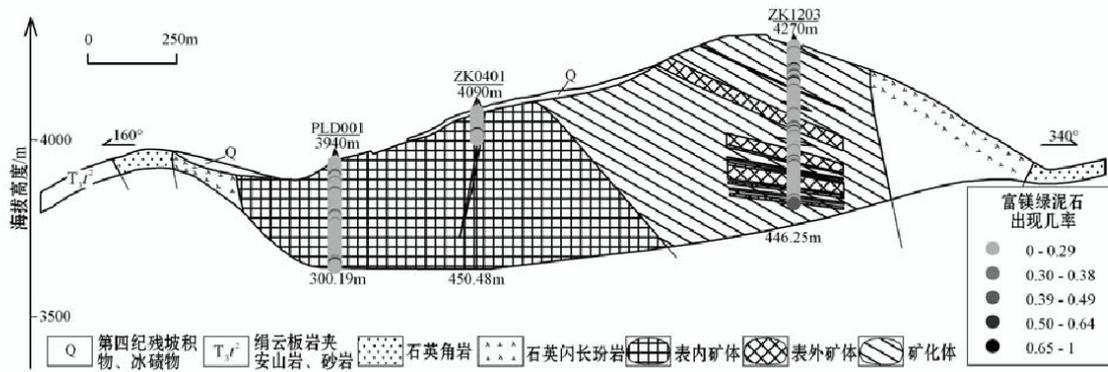


图 8 普朗斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的富镁绿泥石分布

Fig.8 Distribution of Mg-rich chlorite along No. 0 section of the Pulang porphyry copper deposit

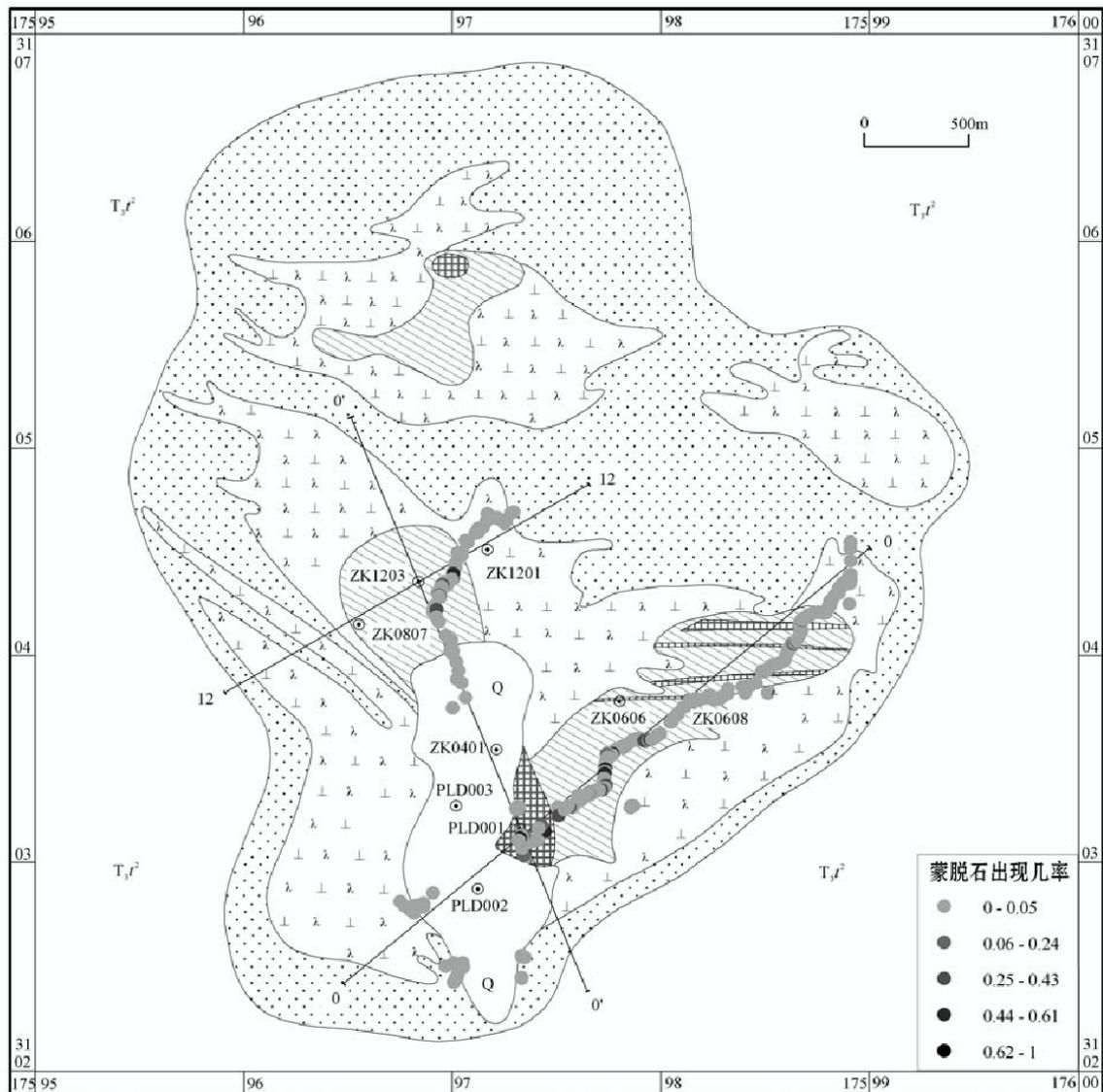


图 9 普朗斑岩铜矿区地表的蒙脱石分布(底图同图 1)

Fig.9 Distribution of montmorillonite at the surface of the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

石较少,主要集中在 1 号矿体及其东北侧和 ZK1203 钻孔附近(图 9)。从剖面上看,0 线剖面蒙脱石也非常少,并且自北东向南西方向分布越来越少;0' 线剖面的蒙脱石也比较少,但具有从东南向西北含量逐渐增多的趋势。在 12 线剖面,蒙脱石较多,并且从东北向西南方向其含量逐渐增多(图 10)。

图 11 显示了蒙脱石在 PLD001 和 PLD003 钻孔中的分布。可以看出,蒙脱石集中分布于主矿体边部,显示了由主矿体向外,蚀变从绢英岩化向泥化过渡的特点。

总体上看,以 ZK0608 为中心,蒙脱石具有向南西方向逐步增多、向北西方向进一步增多的趋势,在垂直方向则具有向北西方向延伸而不断富集的趋势。

#### 4.2.5 黑云母

在普朗铜矿区地表识别出的黑云母主要位于 3 个地段,一是 ZK0608 钻孔附近,二是 PLD001 钻孔附

近,三是 ZK1201 钻孔,似乎有 3 个浓集中心(图 12)。

剖面上,黑云母分布的规律性更强。在 0 线剖面,黑云母主要分布在 ZK0608 钻孔中,数量多且分布均匀,在 PLD001 和 PLD002 钻孔中则相对较少(图 13)。在 0' 线,黑云母在 PLD001、ZK0401 和 ZK1203 三个钻孔中均有分布,且在数量上没有明显的差别(图 14)。

在 12 线,黑云母主要分布于 ZK1203 和 ZK0807 钻孔的下部。尽管在 ZK1201 钻孔地表附近识别出许多黑云母,但在该钻孔深部,黑云母却很少。

#### 4.3 热液蚀变及其分带

根据光谱测量结果,普朗斑岩铜矿区至少可识别出以下 3 个主要的蚀变带:

钾化带:主要以发育丰富的黑云母(有时有金云母)和阳起石为特征,同时叠加有绿泥石、伊利石、硬石膏等矿物。该带以 ZK0608 钻孔为中心,向外围黑

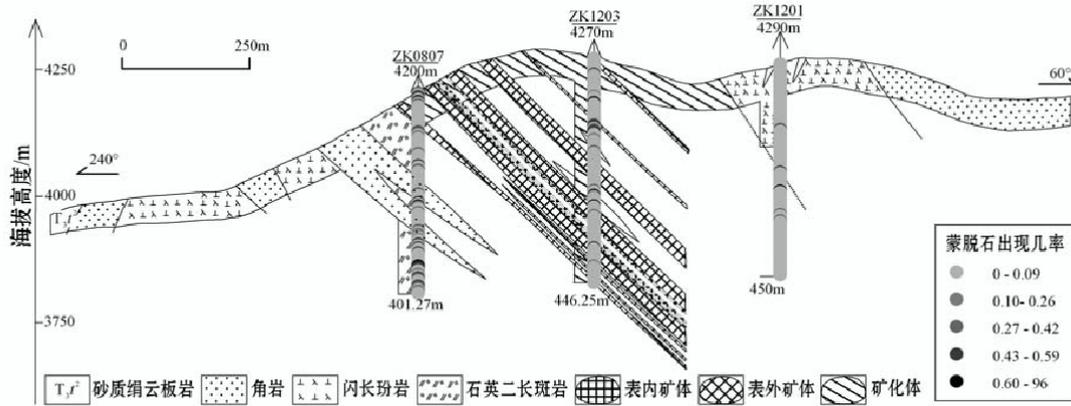


图 10 普朗斑岩铜矿区 12 线剖面识别出的蒙脱石分布

Fig.10 Distribution of montmorillonite along No. 12 section of the Pulang porphyry copper deposit

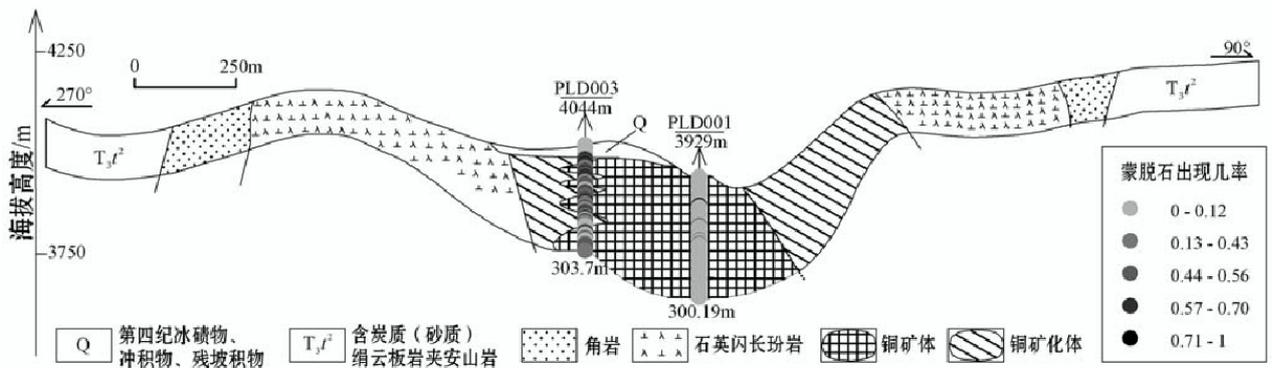


图 11 普朗斑岩铜矿区 PLD001 和 PLD003 钻孔中识别出的蒙脱石分布

Fig.11 Distribution of montmorillonite in Drill Holes PLD001 and PLD003 of the Pulang porphyry copper deposit

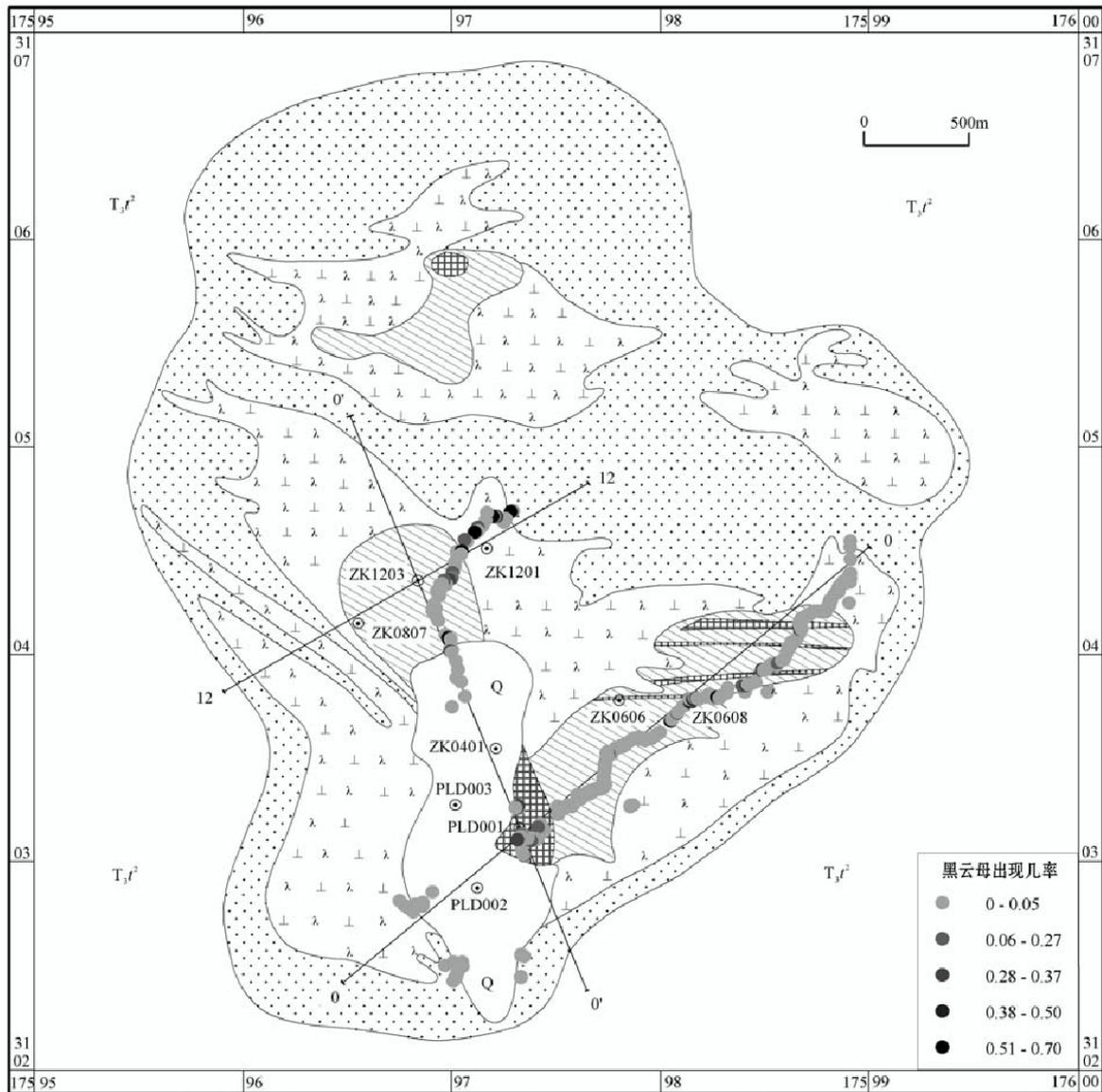


图 12 普朗斑岩铜矿区地表的黑云母分布(底图同图 1)

Fig.12 Distribution of biotite at the surface of the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

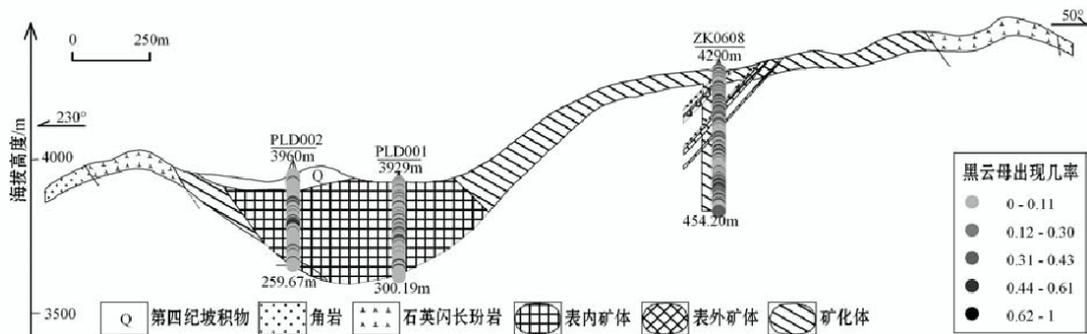


图 13 普朗斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的黑云母分布

Fig.13 Distribution of biotite along No.0 section of the Pulang porphyry copper deposit

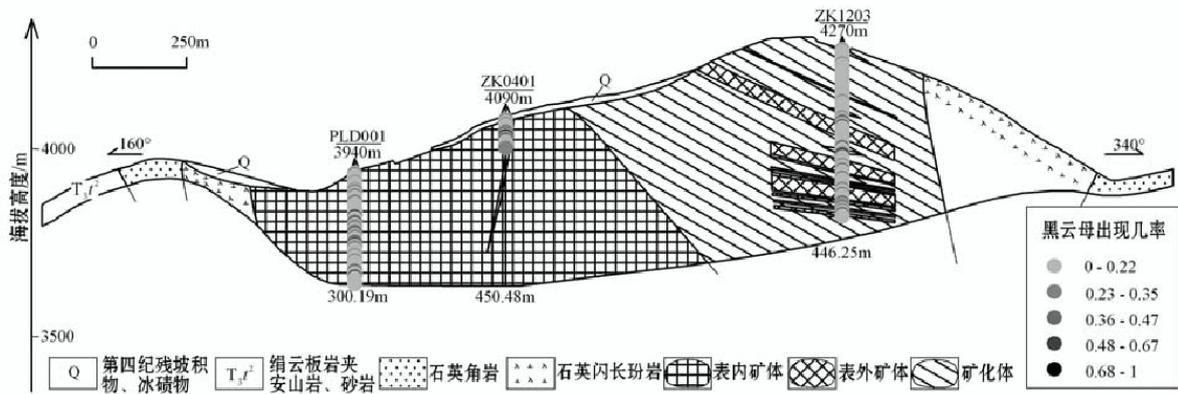


图 14 普朗斑岩铜矿区 0' 线剖面识别出的黑云母分布

Fig.14 Distribution of biotite along No. 0' section of the Pulang porphyry copper deposit

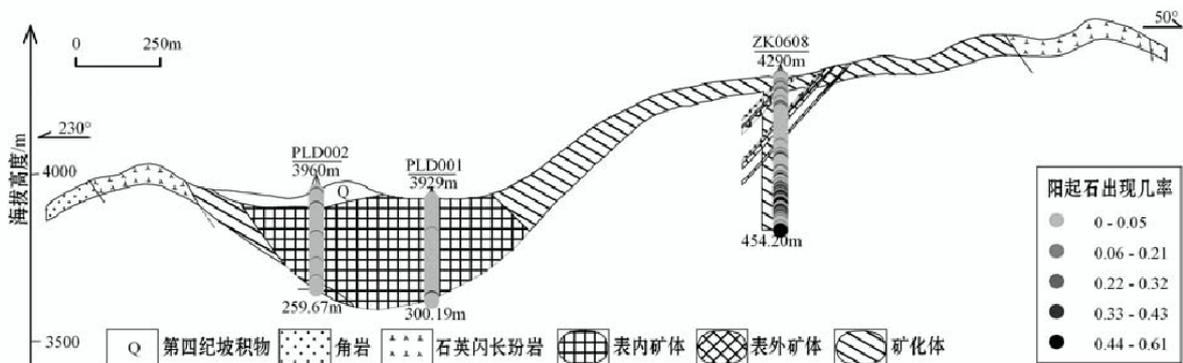


图 15 普朗斑岩铜矿区 0 线剖面识别出的阳起石分布

Fig.15 Distribution of actinolite along No. 0 section of the Pulang porphyry copper deposit

云母含量逐渐减少,而伊利石和蒙脱石等低温蚀变矿物逐渐增多。

钾化带出现大量阳起石(图 15 中 ZK0608 所示),表明斑岩成矿系统的剥蚀程度比较浅,因为阳起石是在近地表条件下,由于酸性蚀变发生氧化作用而形成的。

总体上看,普朗斑岩铜矿区具有较多的黑云母,表明钾质蚀变在本区是比较重要的一次热事件。热液活动的中心位于 ZK0608 钻孔附近,此处也是流体上升的主要通道。按照斑岩成矿系统的一般规律,弥散状的黑云母化蚀变往往发生于成矿作用的早期,而且范围比较大。之后,钾化带被后期的绢英岩化作用叠加改造,因此在 ZK0608 钻孔中也可以看到较多的绿泥石和伊利石。

绢英岩化带:主要以发育绢云母(此处主要为伊利石)为特征,还分布有绿泥石和硬石膏。该带以 ZK0608 钻孔为中心,形成围绕钾化带的晕圈。伊利石是该带的主要蚀变矿物,有的地方为白云母和多

硅白云母。该带不总是严格地受斑岩体的控制。普朗铜矿区主矿体即位于该带内。

泥化带:主要由蒙脱石构成,也见伊利石和绿泥石。无论地表或深部,蒙脱石都具有以 ZK0608 钻孔为中心渐远渐多的特征,而且主要位于绢英岩化带的外部。蒙脱石在外围的大量出现,意味着蒙脱石是在成矿作用的晚期,由于断裂或角砾岩带中冷的地下水下渗而形成,代表了普朗斑岩铜矿成矿作用的最后阶段。

图 16 是根据 PIMA 测量结果描绘的普朗斑岩铜矿区蚀变矿物空间变化特征图。图 17 是根据蚀变矿物空间分布及其变化特征推定的蚀变矿物分带图。

由图 17 可以看出,利用 PIMA 测量获得的蚀变矿物分带具有明显的不对称特点,蚀变中心钾化带位于矿区东部,其内产出低品位铜矿体;绢英岩化带位于主矿体上方及其东侧,是铜矿体产出的主要部位;泥化带较窄,位于矿区西部,以蒙脱石等蚀变矿

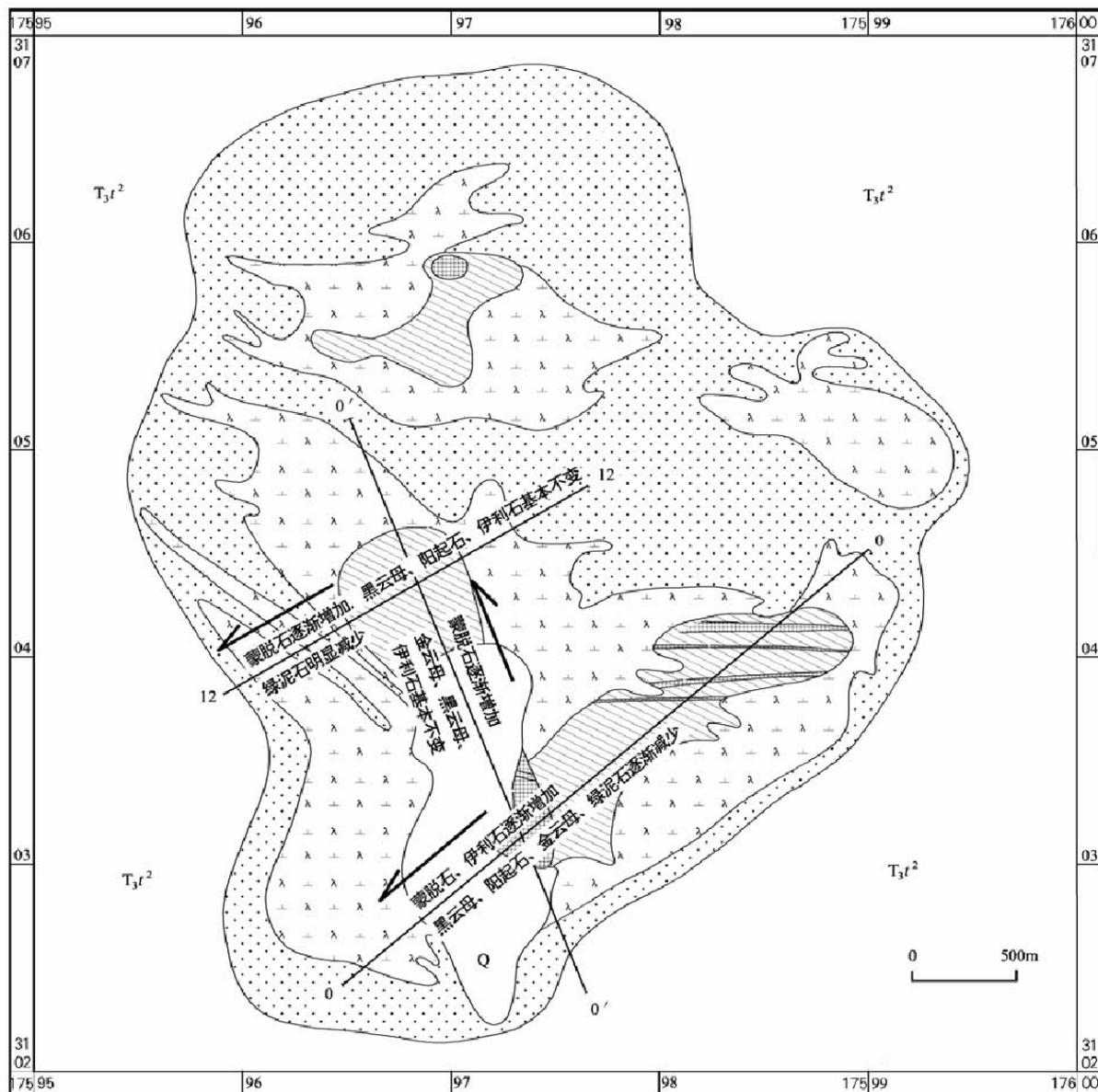


图 16 普朗斑岩铜矿区 PIMA 测量蚀变矿物空间分布特征(底图同图 1)

Fig.16 Distribution of altered minerals identified by PIMA in the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

物增多为突出标志。

前人<sup>①</sup>对普朗地区蚀变分带也进行过研究,得出南、北 2 个蚀变分带系统的认识(图 18)。本次工作对南部主要的斑岩成矿系统开展了 PIMA 测量,得出的蚀变分带模型与前人的(图 18)不同。笔者认为,普朗斑岩铜矿区热液成矿流体系统的中心位于矿区东北部的 ZK0608 附近,而非主矿体上方。在钾化带外围是呈近环状分布的绢英岩化带,主矿体位

于钾化带与绢英岩化带之间,泥化带紧靠绢英岩化带分布,范围很窄。外围可能是青磐岩化带,以绿帘石为主,绿帘石极少,但该带在本区不太明显。

#### 4.4 PIMA 找矿模型

由于普朗铜矿区 PIMA 测量剖面均在斑岩体内或矿体、矿化体内,因此难以从光谱识别所获得的蚀变矿物中确切地分辨出蚀变矿物与矿体(矿化体)或斑岩体的对应关系,从而建立类似土屋斑岩铜矿区

① 范玉华等, 2002. 云南中甸地区铜矿评价地质工作设计.

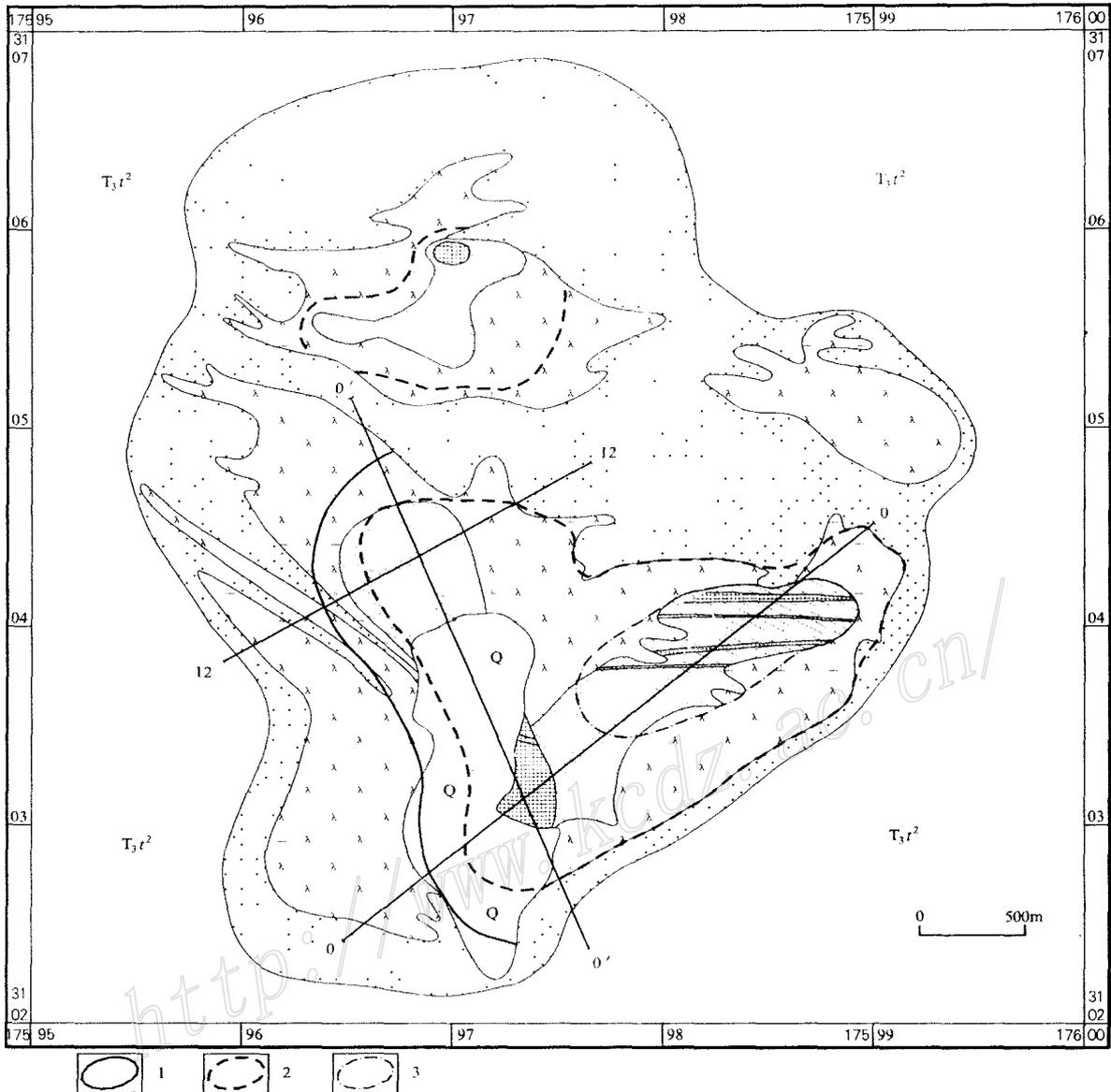


图 17 普朗斑岩铜矿区 PI MA 测量蚀变矿物分带(底图同图 1)

1—蒙脱石界线;2—绢英岩化带界线;3—钾化带界线

Fig.17 Altered mineral zones identified by PI MA in the Pulang porphyry copper deposit (Base map as for Fig.1)

1—Boundary of montmorillonite;2—Boundary of sericite;3—Boundary of potassic alteration

的蚀变矿物或其组合的 PI MA 找矿模型<sup>①</sup>。但是通过建立蚀变矿物分带模型,并根据斑岩铜矿成矿作用的一般规律,可以建立普朗斑岩铜矿区的找矿概念模型,以指导未知地区同类矿床的勘查。

本次工作建立的蚀变矿物分带模型见图 17。该模型与 Lowell 等(1970)提出的石英二长斑岩模式基本一致,唯一的差别是本区青磐岩化带不很发育。

根据 Lowell 的石英二长斑岩模式,主要的斑岩铜矿体位于钾化带外侧及绢英岩化带内,普朗矿区的主矿体也正是在此部位。那么,在现已勘探的斑岩铜矿床外围,继续找矿的方向在哪里?

如果笔者建立的蚀变矿物分带模型是正确的话,普朗斑岩铜矿区进一步找矿的目标应瞄准在以 ZK0608 钻孔为中心的环状范围内,即在钾化带外围

① 范玉华等. 2002. 云南中甸地区铜矿评价地质工作设计.

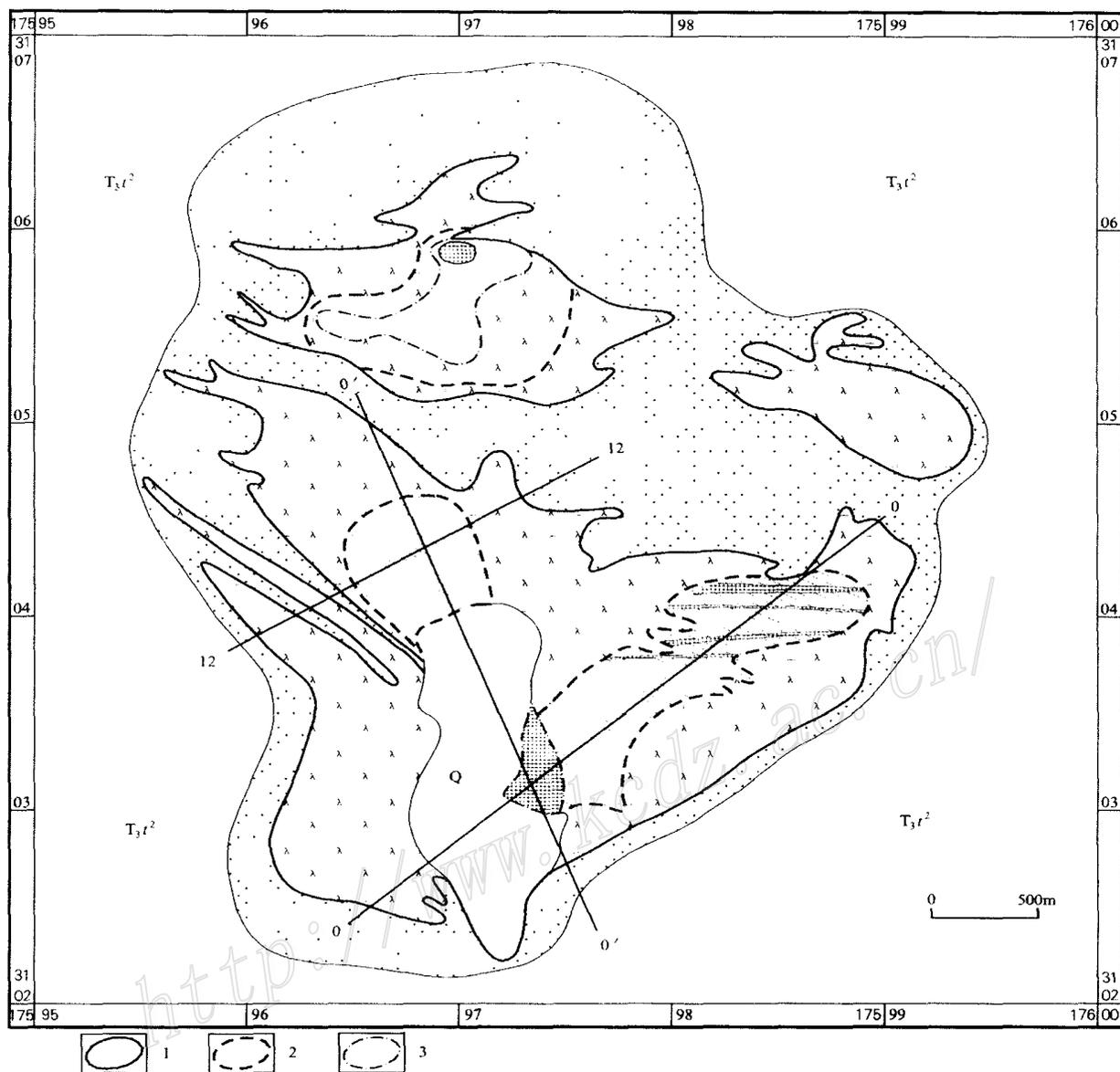


图 18 普朗斑岩铜矿区前人圈定的蚀变分带<sup>●</sup>(底图同图 1)

1—蒙脱石界线;2—绢英岩化带界线;3—钾化带界线

Fig.18 Altered mineral zones identified by previous workers in the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

1—Boundary of montmorillonite;2—Boundary of sericite;3—Boundary of potassic alteration

及绢英岩化带内加大勘查力度。近期应在图 19 中所示的 A 区范围内,加强斑岩铜矿的勘查工作。

## 5 讨论与结论

国外应用 PIMA 仪开展矿物填图和矿产勘查工作已有多年历史,积累了丰富的经验,也取得了很好

的找矿效果。中国地质调查局于 2002 年首次引进 PIMA,并选择中国典型斑岩铜矿区——土屋和普朗斑岩铜矿区开展示范研究,旨在提高中国矿产资源调查评价的科技含量,实现矿产资源勘查的技术性突破和飞跃。

普朗斑岩铜矿区的研究结果表明,PIMA 测量是一种快速获得研究区蚀变矿物组合信息和分布信

● 范玉华等, 2002. 云南中甸地区铜矿评价地质工作设计.

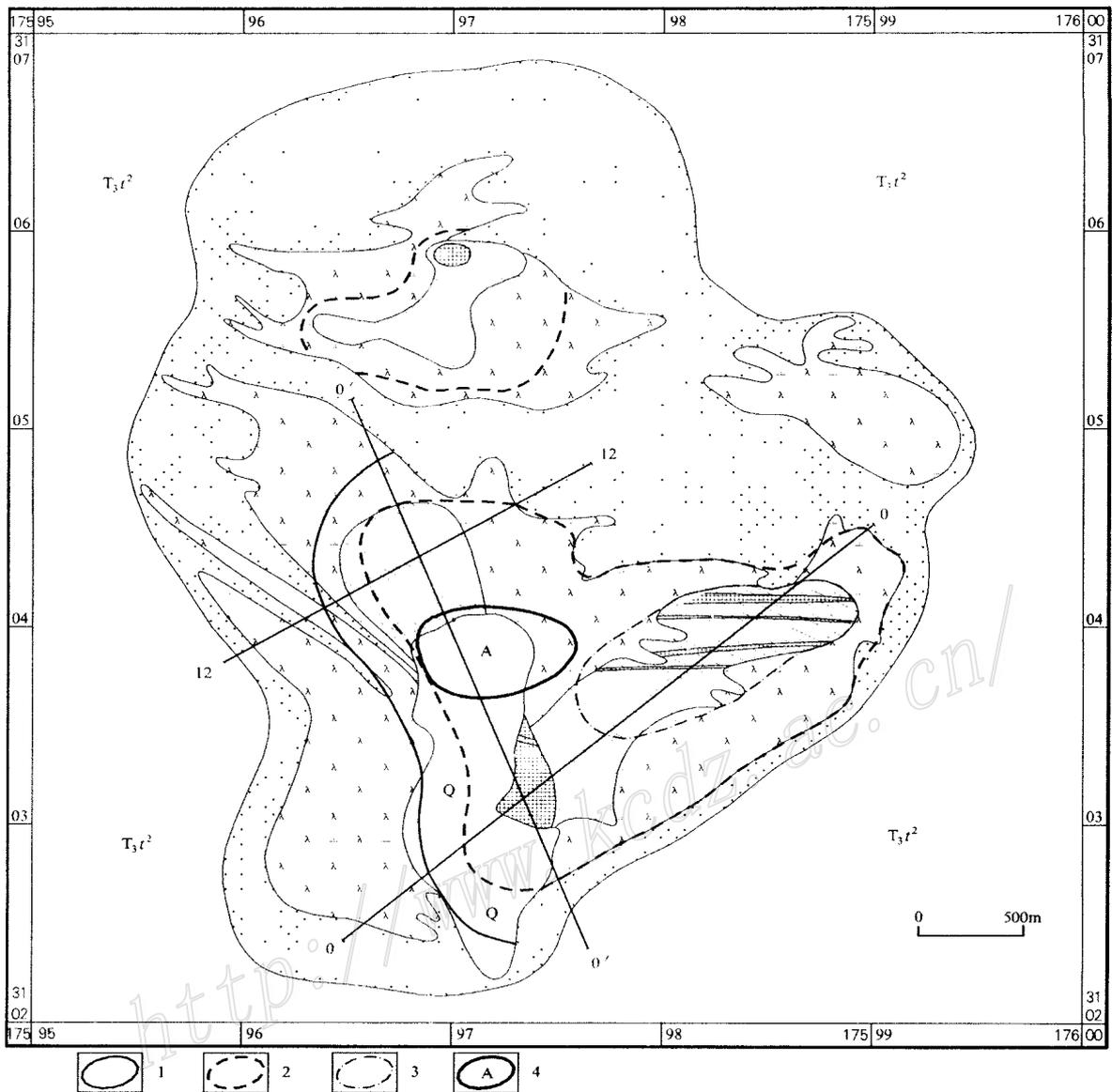


图 19 普朗斑岩铜矿区找矿部署区示意图(底图同图 1)

1—蒙脱石界线;2—绢英岩化带界线;3—钾化带界线;4—勘探部署区

Fig.19 Sketch map of the ore-prospecting area in the Pulang porphyry copper deposit(Base map as for Fig.1)

1—Boundary of montmorillonite;2—Boundary of sericite;3—Boundary of potassic alteration;4—Arranged exploratory area

息的有效方法技术,对矿区勘查工作部署具有指导意义。具体表现为:

(1) 获得了普朗斑岩铜矿区典型的蚀变矿物及其组合在空间上和平面上的分布。主要蚀变矿物包括伊利石、硬石膏、绿泥石(以富镁绿泥石为主)、蒙脱石、黑云母、阳起石等;

(2) 建立了普朗斑岩铜矿区蚀变矿物分带模型。由内而外依次为钾化带、绢英岩化带和泥化带。钾化带以发育丰富的黑云母(有时为金云母)、阳起

石为特征,同时叠加有绿泥石、伊利石、硬石膏等矿物,该带出现大量阳起石,表明斑岩成矿系统的剥蚀程度比较浅。绢英岩化带以绢云母(此处主要为伊利石)为主,还有一些绿泥石和硬石膏。泥化带主要由蒙脱石构成,还见伊利石和绿泥石;

(3) 应用 PIMA 测量获得普朗斑岩体矿区的蚀变矿物分带模型与前人建立的分带模型有所不同,这个模型可以合理解释矿化的空间分布特征并指出可能生成矿作用的部位,为普朗斑岩铜矿区下一

步找矿提供了依据。

笔者认为,应用 PI MA 开展找矿工作,应该与矿区地质调查工作,包括地质、地球物理和地球化学测量工作以及矿床勘探工作紧密结合,同步进行。这样,地质调查和矿床勘探的结果可以与 PI MA 测量结果相互对比,通过信息提取和综合,获得籍以正确指导野外工作部署的认识。

**致谢** 野外工作得到云南省地质调查院李文昌总工、卢映祥教授级高工、蒋成兴高工,以及云南第三地质大队刘玉淳总工、副总工兼普朗项目负责人范玉华高工、项目副负责谭康华高工、王建昆高工、曹晓民工程师的帮助。云南省地质调查院普朗项目组提供了普朗矿区地质图、钻孔柱状图等资料。中国地质调查局资源评价部王瑞江主任、王全明处长及科技外事部彭齐鸣主任、肖桂义处长对本项工作给予了大力支持,谨此致谢。

## References

- Crowley J K. 1999. Association of magnesium-rich clay minerals and borate deposits: A potential remote sensing guide for borate mineral exploration[ A]. International Conference on Applied Geologic Remote Sensing[ C]. 13th, Vancouver, B. C., March 1-3. ERI M International Inc., Proceedings. 1-255-262.
- Denniss A M, Colman T B, Cooper D C, et al. 1999. The combined use of PI MA and VULCAN technology for mineral deposit evaluation at Parys Mountain mine anglesey[ A]. UK: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing[ C]. 13th, Vancouver, B. C., March 1-3. ERI M International Inc. 1-25-32.
- Lowell J D and Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[ J]. Econ. Geol., 65:373~408.
- Passos R V and De Souza Filho C R. 1999. Spectro-mineral mapping using field spectroscopy and the geometry of hydrothermal alteration zones associated with mesothermal gold mineralization: A case study in the Brumal Deposit[ A]. Quadrilatero, Ferrifero, Brazil: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing[ C]. 13th, ERI M International Inc. 1-73-80.
- Pu R L and Gong P. 2000. Hyperspectral remote sensing and its applications[ M]. Beijing: Higher Education Pub. House. 2~9( in Chinese ).
- Yang K, Huntington J F, Boardman J W, et al. 1999. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data[ J]. Australian Journal of Earth Sciences, 46: 915~922.
- Yang K, Browne P R L, Huntington J F, et al. 2001. Walshe Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy[ J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 106: 53~65.
- Yang Y Q, Hou Z Q, Huang D H, et al. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian island arc[ J]. Acta Geocientia Sinica, 23(1):17~24( in Chinese with English abstract ).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Regional geology of Yunnan Province[ M]. Beijing: Geol. Pub. House( in Chinese ).
- Zeng P S, Mo X X, Yu X H, et al. 1999. Preliminary research on the intermediate acidic Yunnan[ J]. Acta Geocientia Sinica, 20( Supp. ): 359~366( in Chinese ).
- Zeng P S, Mo X X, Yu X H, et al. 2003. Porphyries and porphyry copper deposit in Zhongdian area, Northwestern Yunnan[ J]. Mineral Deposits, 22(4): 393~399( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 浦瑞良, 宫鹏. 2000. 高光谱遥感及其应用[ M]. 北京: 高等教育出版社. 2~9.
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[ J]. 地球学报, 23(1):17~24.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[ M]. 北京: 地质出版社.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 1999. 滇西北中甸地区中酸性斑岩及其含矿性初步研究[ J]. 地球学报, 20(增刊): 359~336.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[ J]. 矿床地质, 22(4):393~399.

## Application of S WIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district , Yunnan Province

LIAN Chang-yun<sup>1</sup> , ZHANG Ge<sup>2</sup> and YUAN Chun-hua<sup>1</sup>

(1 Development and Research Centre , China Geological Survey , Beijing 100037 , China ;

2 China University of Geosciences , Beijing 100083 , China)

### Abstract

Altered mineral assemblages are important in the understanding and exploration of hydrothermal ore deposits . The altered minerals and their assemblages have traditionally been identified by naked eyes in the field or by microscopes indoors . However , some fine-grained minerals , especially the minerals with varying compositions , can not be identified exactly . The Portable Infrared Mineral Analyzer ( PIMA ) , a kind of field portable short-wave infrared ( S WIR ) spectrometer , can partly solve the problem and serve as a valuable tool for recognizing the distribution of altered mineral assemblages .

PIMA provides rapid and real time analysis of some altered minerals such as phyllosilicates , clays , carbonates , and selected sulfates , particularly alunite and jarosite . The analysis of data sets requires the use of the spectral reference libraries from different geological environments and may be aided in some cases by computer data-processing packages . Integration of altered mineral assemblages and other exploration data is of benefit to locating drill holes and guiding the exploration work .

PIMA can be used in numerous ore-forming environments , such as the hydrothermal system with high- and/ or low-sulfidation , porphyry , mesothermal fluids , sediments-hosted gold and copper , and VMS . Case studies in the Pulang copper ore district of Yunnan Province demonstrate that PIMA has the ability to rapidly acquire the data and produce drill logging maps , thus helpful to delineating areas for future work .

In this paper , the authors deal in detail with the results of PIMA applying to mapping altered minerals in the Pulang copper ore district . The exploration model based on the S WIR measurement proves to be effective in practical exploration .

**Key words :** geology , S WIR reflectance spectroscopy , PIMA , altered minerals , Pulang , Yunnan