

从喷流成因到斑岩-矽卡岩成矿系统： 甲玛铜多金属矿床成功勘查的几点启示*

宋磊¹, 汪雄武¹, 唐菊兴^{1,2}, 秦志鹏¹, 雷传扬¹, 张俊成¹

(1 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 甲玛铜多金属矿床的成因问题一直影响着地质工作者的找矿思路。勘查项目组在前人地质工作的基础上, 经多次实地踏勘, 初步建立了甲玛-驱龙-邦铺矿集区的区域成矿系列, 通过深入研究矿区的大地构造背景、深大断裂以及次级小断裂、大规模岩浆作用、地层等有利的成矿地质条件, 解决了长期以来制约勘查进展的两个关键科学问题: 是否为斑岩成矿, 成矿中心(深部斑岩体)的位置。逐步建立并完善了斑岩-矽卡岩成矿系统的地质勘查模型, 明确了先易后难、先地表后深部、分阶段寻找隐伏大型斑岩型铜钼金矿的目标, 经合理布置并有效运用多种勘查方法与技术手段, 取得了重大的找矿突破。

关键词 地质学 矿床成因 地质勘查模型 科学找矿 找矿突破 启示

From VMS to porphyry-skarn metallogenic system: Some inspirations from successful exploration of Jiamma copper-polymetallic deposit

SONG Lei¹, WANG XiongWu¹, TANG JuXing^{1,2}, QIN ZhiPeng¹,

LEI ChuanYang¹ and ZHANG JunCheng¹

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The genetic controversy of the Jiamma copper-polymetallic deposit have long affected geologists' prospecting idea. On the basis of previous researchers' work, the Exploration Project Party made repeated field reconnaissance, investigated such favorable geological conditions in this ore district as the tectonic setting, deep faults, secondary small fractures, large-scale magmatism and strata, i. e., on such a basis, solved two scientific problems which had affected exploration progress for a long time, whether it belongs to porphyry mineralization or not; where is the mineralization center (deep porphyry). Finally, the Exploration Project Party gradually formulated an improved geological exploration model for the porphyry-skarn ore mineralization system and delineated the target where the hidden and large porphyry copper-gold-molybdenum deposit is likely to be found on the principle that doing the easy work first and the difficult work later, conducting exploration from surface to the depth and by stages, and rationally arranging and effectively using various exploration methods. It is expected

* 本文得到国土资源部西藏甲玛斑岩铜多金属矿科学基地协作研究(编号: ZH0908-3)、地质调查项目“念青唐古拉地区成矿条件研究与找矿靶区优选”(编号: N0807)、青藏专项(编号: 1212010818089)、西藏华泰龙矿业开发有限公司勘探项目、技术开发项目“西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床地质特征及找矿方向研究项目”(编号: Z0804)、教育部岩石学矿床学国家重点(培育)学科建设项目(编号: SZD0407)、国土资源部西藏自治区矿产资源潜力评价项目(编号: 1212010813025)的联合资助

第一作者简介 宋磊, 男, 1987 年生, 在读硕士研究生, 主要从事矿产普查与勘探。Email: cdutsl@163.com

收稿日期 2010-11-10; 改回日期 2011-02-20。许德煊编辑。

that a major breakthrough in ore-prospecting can be achieved on such a basis.

Key words: geology, deposit genesis, geological exploration model, scientific exploration, exploration breakthrough, inspirations

科学找矿是地质与物、化、遥的合理综合,是理论找矿、综合找矿、立体找矿、定量找矿的紧密结合(赵鹏大,1992),是实现重大找矿突破的关键,通过科学找矿获得突破的例子很多(潘彤等,2001;李向民等,2004;李智明等,2007)。

甲玛矿床的勘查工作始于1951年,迄今已有多支团队对其进行过地质勘查及资源储量估算。1967年,西藏第一地质大队获得其铜远景金属量6.7万吨。1991~2000年,西藏地质六队将其作为沉积喷流成因矿床对其展开详查,探明了资源储量(332+333)铜25.9万吨、铅46.24万吨^①。

2007年至今,本项目组在充分利用前人资料,以及经过详实地质研究的基础上,确定甲玛矿床属岩浆热液交代成因,建立了斑岩-矽卡岩成矿系统的地质勘查模型,查明其成矿中心位于该矿区北部深处,明确了寻找隐伏大型斑岩铜矿的目标。据最新勘查资料,甲玛矿床现已控制的铜、钼、金、银、铅、锌资源储量均达大型,并且还具有增储的良好潜力。勘查表明:①在甲玛矿区,先后发现4种最主要的矿石类型,即矽卡岩型、角岩型、斑岩型及大理岩内的硫化物脉型;②矽卡岩型矿体向深部延伸加大,其最大斜深大于1500m,工程见矿厚度2~252.2m(郑文宝等,2010a,2010b),在深部,钼资源量大增;③在甲玛矿区的深部和周边地区,矿体尚未封闭,在原以为是矿体边界的47线、49线,钻到20多m厚的富铜矿体,矿体长度大于3000m,在原以为矿体不厚的0线,发现了291m厚的富铜矿体,且沿走向连续;④向北部深处(成矿中心),斑岩型矿石逐渐增多。

甲玛铜多金属矿床的最新勘查进展表明:它是冈底斯成矿带内通过科学找矿与模式找矿的结合,在短期内取得重大突破的范例,对冈底斯斑岩成矿带成矿系列的完善有理论上的贡献,对同类型矿床的勘查有实践指导意义。

1 找矿思维与勘查方法——科学找矿与模式找矿的结合

1.1 岩浆热液-交代成因的厘定

前人认为甲玛矿床属喷流沉积成因(姚鹏等,1999,2002;潘凤雏等,2002),其依据是,甲玛矿区内的矿体呈层状、似层状产出,矿石呈条带状、层纹状构造。但本项目组经过以下分析,认为其应属岩浆热液-交代成因:

(1)该矿区内未见重晶石岩、条带状电气石岩或含电气石岩、条带状含长石岩或富长石岩、重晶石层或石膏层或燧石岩(肖荣阁等,2001)等典型的热液沉积岩,蚀变围岩中未见重晶石化、菱铁矿化及蒙托石-沸石带,但发育有岩浆热液-交代成因的矽卡岩、角岩、大理岩。矽卡岩中石榴子石的粒径较大,多数为1~20mm。

(2)矿区内斑岩型、矽卡岩型、角岩型矿石中辉钼矿的成矿年龄集中在15Ma左右(应立娟等,2009),与冈底斯斑岩铜矿带内斑岩铜矿的成矿年龄(15±1)Ma(侯增谦等,2003;孟祥金等,2003;芮宗瑶等,2004)相近。甲玛矿床的主成矿期属中新世晚期,而海底喷流沉积则产于晚侏罗世-早白垩纪时期(约为95~154Ma),两者差距甚远。

(3)流体包裹体液相成分研究表明,其 Na^+/K^+ 主要介于0.22~0.83之间。矽卡岩内石英单矿物的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 及 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 组成范围分别为-104‰~-75‰、5.37‰~11.5‰,指示其成矿流体为岩浆来源。矽卡岩型矿石内硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值集中在-4.78‰~0.83‰,斑岩铜矿硫化物单矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 集中在-1.55‰~-1.26‰,反映了岩浆硫的组成特点。斑岩中石英斑晶的流体包裹体内含有黄铜矿子矿物,表明在岩浆结晶分异过程中已存在富含成矿金属物质的流体,暗示了成矿金属物质来自岩浆(周云,2011)。

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫信,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,张丽,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区0-16-40-80、0-15线矿段资源量核实报告. 内部资料.

表 1 甲玛、驱龙、邦铺含矿斑岩及矽卡岩的年龄

Table 1 Ages of ore-bearing porphyry and skarn from Jiama, Qulong, Bangpu ore districts

矿 区	岩 性	测试对象	方法	年龄/Ma	资料来源
甲 玛	花岗闪长斑岩	全岩	K-Ar	14.9	杜光树等,1998
	花岗斑岩	全岩	K-Ar	13.4	杜光树等,1998
	矽卡岩 Cu-Mo 矿 [±] 石	辉钼矿	Re-Os 等时线	15.18±0.98	李光明等,2005
	矽卡岩 Cu-Mo 矿 [±] 石	辉钼矿	Re-Os 等时线	15.34±0.10	应立娟等,2009
	花岗斑岩	全岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	15.31-16.27	秦志鹏,2010
	二长花岗斑岩	全岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	14.81±0.16	秦志鹏,2010
驱 龙	二长花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os 等时线	16.41	孟祥金等,2003
	石英二长斑岩	锆石	离子探针(SHRIMP)锆石 U-Pb	17.58±0.74	李光明等,2004
	石英二长斑岩	锆石	离子探针(SHRIMP)锆石 U-Pb	16.35±0.4	王亮亮等,2006
	Cu-Mo 矿石	辉钼矿	Re-Os 等时线	16.23±0.6	王亮亮等,2006
邦 铺	花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os 等时线	15.32	孟祥金等,2003

1.2 初步建立区域成矿系列

同处于冈底斯铜矿带东段弧后裂谷盆地的驱龙、邦铺矿床,在甲玛矿床之前已成为国内重要的铜多金属矿产资源地。在形成时间上,这 3 个矿床都集中在 17~15 Ma(表 1);在空间上,这 3 个矿床都处于造山后伸展走滑体制下,严格受 NS 向正断层的控制,呈 NS 向串珠状展布(图 1)。

据此推测,伴随着雅鲁藏布江古消减带板片拆沉,地幔物质上涌,导致增厚的镁铁质新生下地壳发生部分熔融,并形成了埃达克质岩浆,这不为驱龙、邦铺矿床提供了成矿物质来源,也为甲玛矿床的形成奠定了物质基础。因此,本项目组决定初步建

立起驱龙-甲玛-邦铺区域成矿系列,进行矿集区、矿田和矿床方向的成矿规律研究,以便为甲玛矿床取得找矿突破提出战略性方向,为建立甲玛矿床的找矿模式提供具体的建议。

1.3 实现甲玛矿床找矿突破的关键科学问题

本项目组清楚地认识到,要突破长期制约甲玛矿床规模扩大的瓶颈,首先面临的是 2 个关键问题:判断其是否为斑岩成矿;判断其成矿中心(深部斑岩体)的位置。因此,本项目组在制定勘查计划时,紧紧围绕这 2 个问题,分阶段、分地段,由浅入深、先易后难,重点实施了对深部斑岩体的探索,这是甲玛矿床实现重大找矿突破的战略条件。

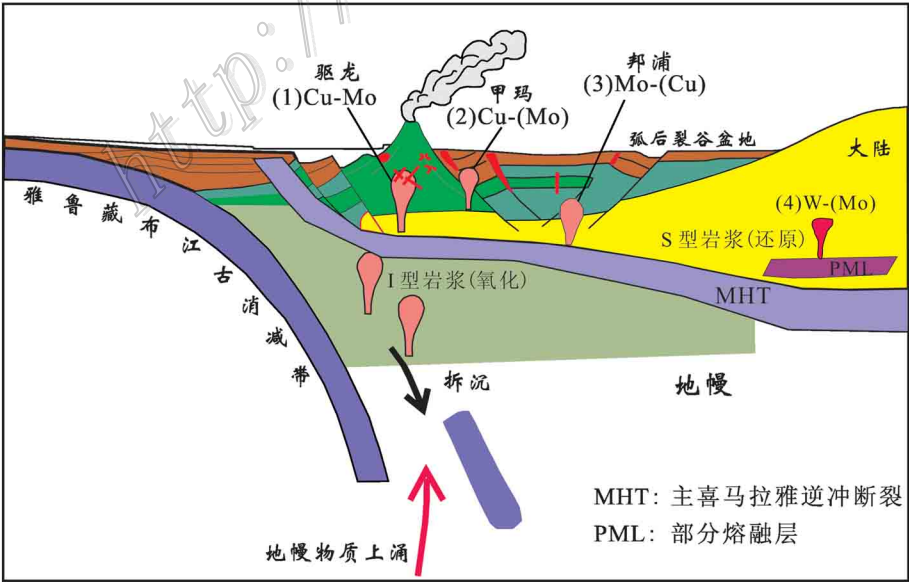


图 1 驱龙-甲玛-邦铺矿集成矿系列示意图

Fig. 1 Diagrammatic map of metallogenic series in Qulong-Jiama-Bangpu ore concentration area

2 建立并不断完善甲玛斑岩-矽卡岩成矿系统的地质勘查模型

2.1 成矿潜力分析

2.1.1 成矿可能性

(1) 岩体内的熔融包裹体在均一过程中具收缩气泡,部分形成 2~3 个挥发分气泡,周边还分布有稀疏的流体包裹体群(周云等,2011),证实了岩浆熔融体中含有大量挥发分。

(2) 在岩浆-热液过渡阶段,有大量流体出溶的证据,表明斑岩富含水,晚期富 F,有利于成矿流体的形成。

(3) 铜山-则古朗地区发育有宽 0.1~2 m 的二长花岗斑岩脉,岩体顶部的围岩多发育有网脉状破裂系;原生晶洞构造内发育白云母;林布宗组地层内出现由细晶岩组成的硅帽(图 2)。这表明花岗岩局部流体饱和(汪雄武等,2002),有流体出溶迹象。

2.1.2 有利的成矿地质条件

(1)大地构造背景

甲玛矿床位于冈底斯构造-岩浆带中-东段的南缘,成矿年龄为 15 Ma 左右,属印度板块-欧亚板块“后碰撞”阶段(25 Ma 以后,候增谦等,2006)。在该阶段,热的下地壳物质在 NS 向挤压应力场背景下塑性流动,使拉萨地体内的上地壳缩短加厚,地壳增厚

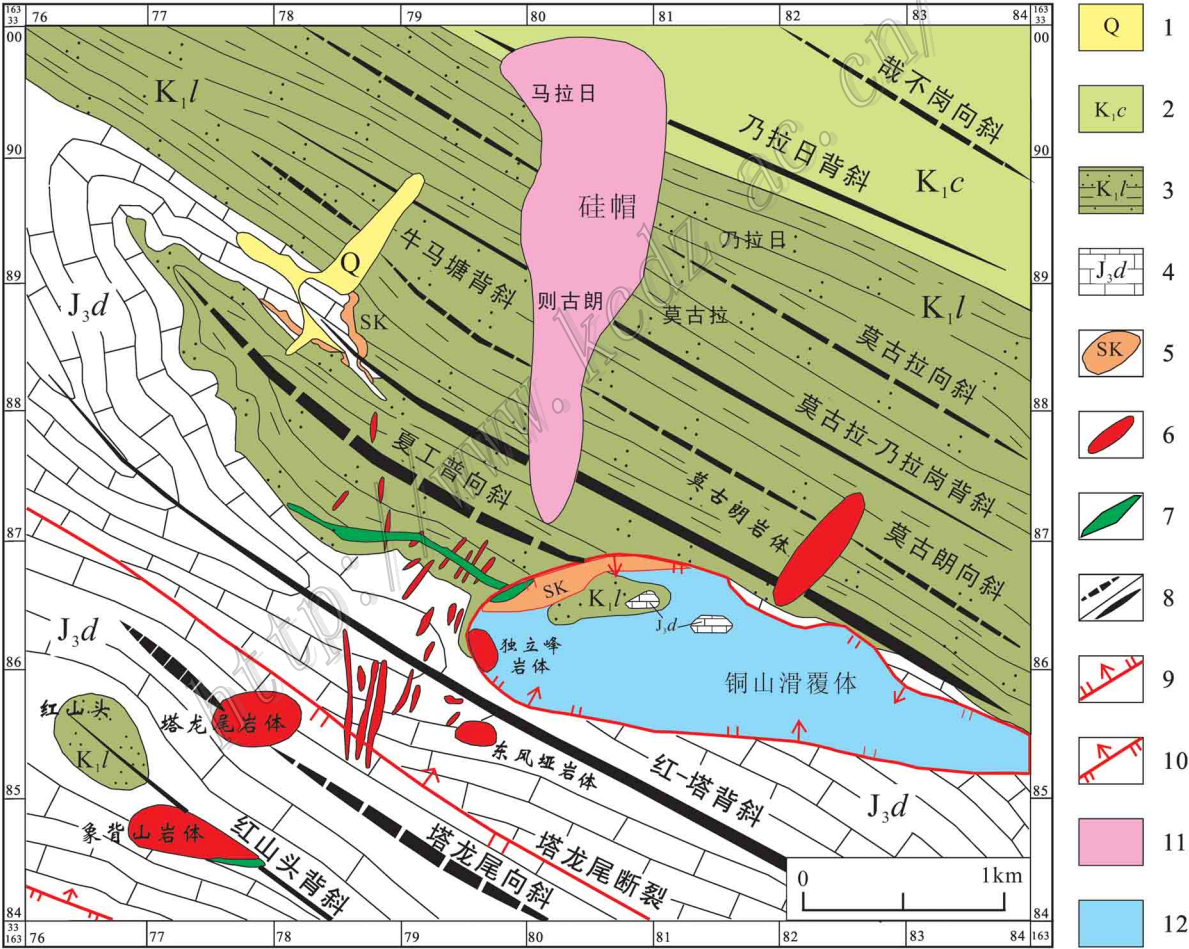


图 2 甲玛矿区建造构造图(据秦志鹏等,2011 修改)

1—第四系; 2—楚木龙组(K_{1c}); 3—林布宗组(K_{1l})砂岩与板岩互层; 4—多底沟组(J_{3d})灰岩; 5—矽卡岩; 6—侵入岩体; 7—矿体; 8—向斜/背斜; 9—正断层; 10—逆断层; 11—硅帽; 12—铜山滑覆体

Fig. 2 Structural map of the Jiama ore district (modified after Qin et al., 2011)

1—Quaternary; 2—Chumulong Formation (K_{1c}); 3—Sand-slate of Linbuzong Formation (K_{1l}); 4—Limestone of Duodigou Formation (J_{3d}); 5—Skarn; 6—Intrusive rock; 7—Ore body; 8—Syncline/Anticline; 9—Normal fault; 10—Reverse fault; 11—Silicon cap; 12—Tongshan gliding nappe

有利于巨厚斑岩矿床的形成。在 18 Ma 左右 (Williams et al., 2001), 构造松弛, 地壳呈 EW 向伸展, 形成了甲玛地堑和相应的正断层系统, 控制着驱龙、甲玛和邦铺矿床呈带状产出。

(2) 有利的地层、构造、岩浆岩

区内出露的地层主要为被动陆缘环境下形成的一套碎屑岩-碳酸盐岩系^①, 包括下白垩统林布宗组 (K_1l)、上侏罗统多底沟组 (J_3d) 以及第四系 (Q)。林布宗组 (K_1l) 是矽卡岩型矿体的顶板, 角岩型矿体的赋矿岩石, 该套地层为砂板岩建造, 为成矿物质的富集、沉淀提供了天然的地球物理障和地球化学障, 在矿区范围内, 该套地层受岩浆系统的长期热烘烤而发育较强的角岩化。多底沟组 (J_3d) 是矽卡岩矿体的底板, 为中厚层灰岩建造, 在矿区范围内它发育强烈的大理岩化。

区内发育有不同级别、不同性质的构造, 尤其是多底沟组与林布宗组的层间构造以及甲玛-卡军果推覆构造体系, 不仅为成矿流体的运移提供了通道, 也为成矿物质的富集、沉淀提供了空间。

区内的岩浆岩主要为中新世花岗岩类。一方面, 后碰撞阶段形成的斑岩体在侵位过程中, 其自身可形成斑岩型铜钼矿; 另一方面, 区内富含流体、挥发分、高氧化态的似埃达克质岩浆与富钾基性岩浆混合, 促使铜、钼、金等亲硫元素大量析出 (秦志鹏, 2010), 为矿床的形成提供了重要的成矿物质来源。

(3) 多类型多期次岩浆活动

区内岩脉间的穿切关系显示, 花岗斑岩侵位最早 (15.31~16.27 Ma), (石英) 闪长玢岩次之, 然后是二长花岗斑岩 (14.81 Ma 左右) 和花岗闪长斑岩 (秦志鹏, 2010)。同时可见, 后期热液蚀变 (碳酸盐化、泥化) 不同程度地叠加于早期蚀变之上, 形成了类型不同的蚀变矿物组合, 这为区内可能存在叠加成矿提供了证据。

(4) 有利的矿质沉淀和保存条件

多底沟组碳酸盐岩与林布宗组碳质板岩的层间破碎带是一种理想的矿体形成界面 (Hochella et al., 1992), 当中酸性的含矿热液运移至此, 极易与碳酸盐岩围岩发生水/岩反应, 从而引起矿质沉淀; 加之林布宗组碳质板岩的还原性和致密性, 使岩浆热液在此处大量聚集, 并与围岩发生充分的双交代作

用, 为成矿物质的进一步沉淀和保存提供了极其有利的条件。

2.2 建立并不断完善斑岩-矽卡岩成矿系统的地质勘查模型

在勘查过程中, 依次发现了矽卡岩型矿体、角岩型矿体、斑岩型矿体和大理岩中的硫化物脉型矿体。

(1) 矽卡岩型主矿体 呈层状、似层状产于多底沟组上部与林布宗组的接触部位, 总体走向为 NWW 向, 倾向 NE, 由浅到深矿体逐渐陡倾, 再向下变缓。其余 8 个小矿体因受滑覆构造的影响, 多呈透镜状产于多底沟组灰岩、大理岩中。

(2) 角岩型矿体 位于矽卡岩型矿体之上, 以“塔松状”、厚层块状产于林布宗组角岩中, 产状直立或不规则。矿体上半部分富含铜, 下半部分富含钼。其矿石矿物以辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿为主, 矿石结构主要有结晶结构、交代结构、固溶体分解结构等, 矿石构造主要为团块状构造、角砾状构造等 (王煥, 2011)。

(3) 斑岩型矿体 赋存在角岩型矿体之下, 多呈细脉浸染状产于岩脉、岩株中, 虽探明规模不大, 但因花岗斑岩及闪长玢岩脉体中有较强的钼矿化, 故具有形成大型斑岩型 Mo-Cu-Au 矿体的可能性。

(4) 大理岩中的硫化物脉型矿体 产于较下部的构造裂隙中。

通过外围相关矿床 (体) 类型可以反映出热液系统的规模 (Hammarstrom et al., 1995)。本项目组认为, 甲玛矿床虽以矽卡岩型和角岩型矿体为主, 但两者的形成与斑岩体密切相关: ① 经锆石 U-Pb 测年 (秦志鹏等, 2011), 塔龙尾岩体、象背山岩体、独立峰岩体、东风垭岩脉的成岩年龄分别为 (16.27 ± 0.31) Ma、 (15.99 ± 0.34) Ma、 (15.31 ± 0.24) Ma、 (14.81 ± 0.16) Ma, 与甲玛矿床的成矿年龄 (14.99 ± 0.14) Ma (应立娟等, 2010) 一致, 指示出斑岩系统是成矿的岩浆前兆, 与成矿物质一起都来自深部同源岩浆房, 是成矿物质的载体; ② 显示出深部有大斑岩体的迹象 区内的成矿斑岩体主要以岩枝状产出, 且呈放射状分布, 犹如树冠, 暗示深部可能存在“树干、树兜”; ③ 在时间上, 甲玛斑岩的成岩年龄集中在 15 Ma 左右, 其中, 斑岩型矿石中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (14.78 ± 0.33) Ma (唐菊兴等, 2010), 矽卡

① 唐菊兴, 王登红, 钟康惠, 汪雄武, 郭衍游, 刘文周, 应立娟, 郭娜, 郭科, 郑文宝, 秦志鹏, 李磊, 凌娟, 叶江, 黎枫信, 姚晓峰, 李志军, 孙艳, 王友, 白景国, 唐晓倩, 张丽, 裴有哲, 彭惠娟. 2009. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区 0-16-40-80、0-15 线矿段资源量核实报告. 内部资料.

岩型 Cu-Mo 矿石中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 $(15.1 \pm 0.98) \sim (15.34 \pm 0.10)$ Ma(应立娟等, 2010), 角岩型矿石中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (14.67 ± 0.19) Ma(唐菊兴等, 2010), 成岩与成矿的时间高度一致, 暗示砂卡岩、角岩与斑岩体具有紧密的成因联系; ④ 在空间上, Cu、Mo 矿化呈 NNE 向雁列式展布(秦志鹏, 2010), 与斑岩体一致(图 2); ⑤ 林布宗组出现大范围的碳质板岩的角岩化和碳酸盐岩的砂卡岩化, 表明深部岩浆穹隆对碳质板岩的烘烤以及流体与碳酸盐岩之间发生双交代作用的长期性, 角岩中石英脉的流体包裹体的温度和盐度特征与斑岩中石英脉的基本相似, 均一温度平均为 354°C , 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 平均为 37%(周云, 2010)。基于

这些认识, 并结合多条勘探线剖面, 逐步建立和完善了甲玛矿床的地质勘查模型(图 3)。

中酸性岩浆在岩浆房中经过一定程度的结晶分异, 致使岩浆中挥发分过饱和, 流体相和熔体相发生不混溶, 从而促使携带成矿元素的岩浆热液-挥发分从岩浆房析出, 在斑岩体内形成钾硅酸盐化, 其顶部大量富集富含 Cu、Au、Mo 等成矿元素以及 K、Na 等物质的流体。该阶段在甲玛矿床中形成的矿化不强。成矿金属元素的富集主要通过“二次沸腾”——与岩浆热液不混溶的高浓度挥发分引起了则古朗南端深部斑岩体顶部盖层的破裂(图 3), 大量富挥发分的岩浆热液沿隐爆角砾岩筒及深部隐伏断裂上升, 不断向岩株、岩枝部位集中, 强大的内压力导致岩体

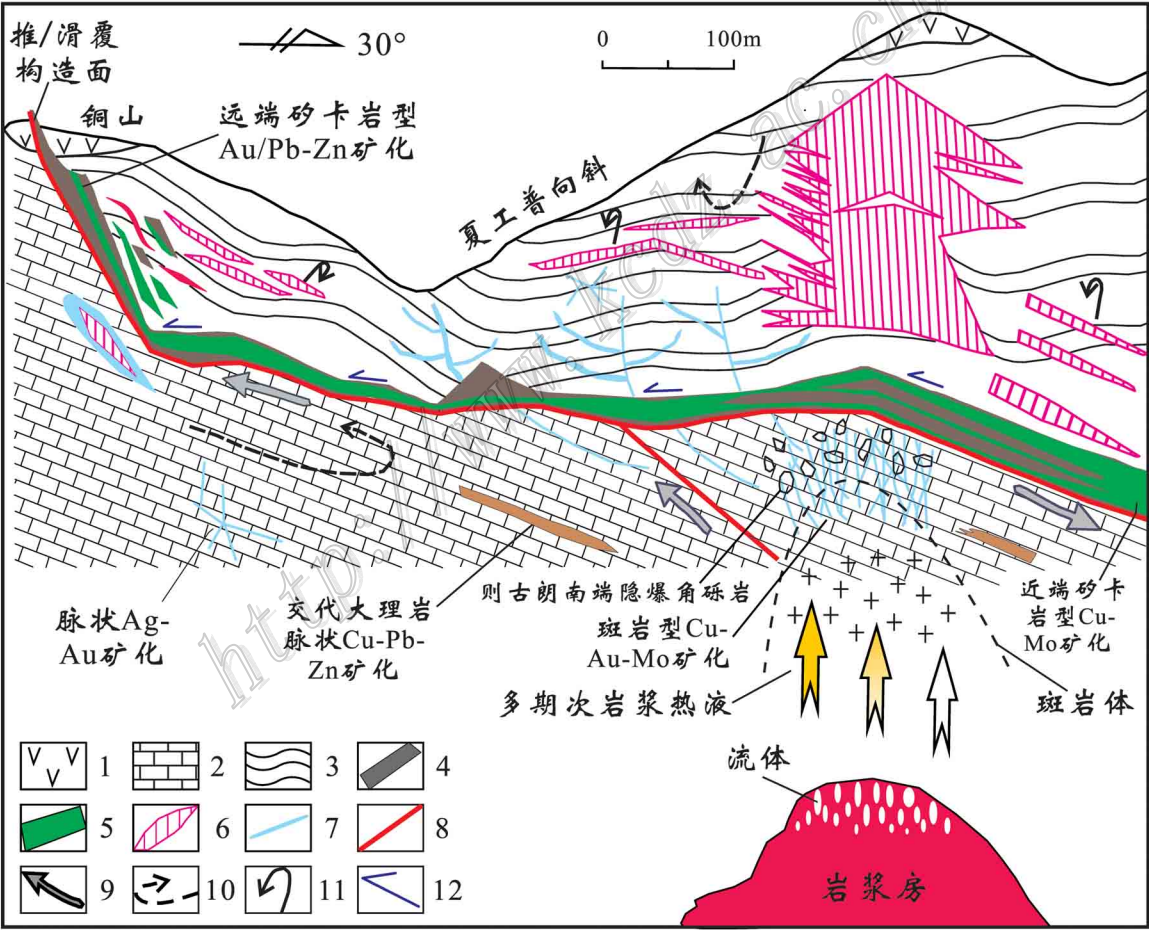


图 3 甲玛铜多金属矿床地质勘查模型

1—林布宗组(K_1l)砂板岩; 2—多底沟组(J_3d)灰岩、大理岩; 3—碳质板岩; 4—砂卡岩; 5—砂卡岩型矿体; 6—角岩型矿体; 7—含矿岩脉; 8—断裂; 9—流体运移; 10—大气降水; 11—碳质板岩对流体的屏蔽作用; 12—推覆方向

Fig. 3 Geological exploration model of the Jiaoma copper-polymetallic deposit

1—Sand-slate of Lower Cretaceous Linbuzong Formation (K_1l); 2—Limestone and marble of Upper Jurassic Duodigou Formation (J_3d); 3—Carbonaceous slate; 4—Skarn; 5—Skarn-type orebody; 6—Hornfels-type orebody; 7—Ore veins; 8—Fracture; 9—Fluid migration; 10—Atmospheric precipitation; 11—Shielding effect of carbonaceous slate on fluid; 12—Direction of the overthrust

顶部破裂,相对封闭的体系转化为开放体系,高温含矿流体因减压而沸腾。在近端碳酸盐岩地层中的有利部位经接触交代形成了矽卡岩型 Cu 、 Mo 矿化,部分气液沿层间滑脱带或引张裂隙带充填、交代,形成了外围岩浆热液充填交代成因的脉型多金属矿化。当富含成矿元素的岩浆期后热液及挥发分运移至多底沟组和林布宗组的扩容空间,林布宗组碳质板岩对流体的屏蔽作用使流体在接触带内大量聚集,并与围岩发生充分的双交代作用,后经晚阶段与大气降水的混合,成矿流体的温度、盐度、密度、氧逸度、硫逸度等物理化学参数迅速降低(周云,2010),金属进一步富集,在远端形成了矽卡岩型 Pb 、 Zn 矿化。同时,林布宗组的砂板岩经热接触蚀变为角岩,范围大于 40 km^2 ,在岩枝出现的地段蚀变尤为强烈,部分地段可见硅化叠加于角岩化之上,形成了与钼矿化密切相关的角岩型矿化。

2.3 主要找矿标志

(1)矿物学标志 部分石英斑晶的边缘因溶蚀而呈蠕虫状、港湾状;石英斑晶具骸晶结构、环状花斑状结构;石英斑晶显微裂隙及其溶蚀加大(彭惠娟等,2011);石英斑晶发育孔洞(充填石英脉和金属硫化物);显微晶洞构造、单向固结结构发育;黑云母和角闪石的 F 含量高。

(2)地质标志 与矿化关系密切的碳酸盐岩的粗粒矽卡岩化、大理岩化、硅化、绿帘石化、绿泥石化等宏观层面的蚀变标志;出露的岩体主要为花岗闪长斑岩和花岗斑岩等,呈小岩株(枝)产出;地表有大范围的孔雀石化和蓝铜矿化,在地下氧化强的部位可见硅孔雀石化、萤石和硬石膏;地下水露头中有大量的铜沉淀物,铜山和则古朗一带有近 NS 向的火山皮;在 ZK3216 钻孔的北东方向,出现钼华露头及热液隐爆角砾岩。

(3)地球物理标志 甲玛矿区处于一个相对重力高鼻状异常带与相对重力低鼻状异常带的转换部位,该处的异常等值线为 NW 走向,梯度极大,暗示存在 NW 向深断裂;由矿体形成的自电异常以铅山东坡最为典型,其特点为梯度陡、宽度窄,是反映在山地异常及板岩异常背景上的第3级异常;该矿区处于一条 NE 向的弱-中高磁异常条带上,磁异常特征复杂。

(4)地球化学标志 区内水系沉积物的异常元素以 Au 、 Ag 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Mo 等为主,异常形态简单,强度及规模大,富集趋势明显。

(5)遥感异常标志 遥感构造信息解译显示,在矿区及外围的近 EW 向线性构造上有2个环形构造;在线性体发育地区,解译出硅化、褐铁矿化、碳酸盐化等蚀变异常带,可初步断定该区内的矿化受构造的影响较大。

3 构造对流体运移、汇聚、沉淀的控制

甲玛矿床位于冈底斯斑岩铜矿带内,受区域性的正断层系统和裂谷-断裂系(侯增谦等,2004)的影响,产于 EW 向伸展构造(滑覆构造系统)与 NS 向伸展构造(正断层系统)的交汇部位。该矿区发育有 NWW 向、 EW 向断裂,以及 NE 向、 NW 向及近 NS 向的次级断裂(图2)。

上述构造系统提高了岩体裂隙的扩张程度,不仅为流体向远离斑岩体的场所扩散提供了有利空间,也为岩浆热液的运移提供了通道及矿质沉淀场所。矿体的形态、产状及空间展布严格受断裂构造的控制;结晶分异作用促使溶解了大量成矿元素的流体出溶,而矿区内由 NWW 向断裂所产生的构造应力为流体向上运移提供了重要的驱动力,在上升过程中,随着物理和化学条件的变化,流体中的成矿物质不断析出,当遇到多底沟组碳酸盐岩时,与之发生接触交代反应,形成了矽卡岩型矿体,以及大理岩型脉状 Cu-Pb-Zn 矿体。到近浅地表时,流体主要以中酸性岩浆期后热液的形式向上运移,至多底沟组与林布宗组的接触带,甲玛-卡军果推覆构造系及其伴生的滑覆构造系为流体的运移及储存创造了有利条件,使流体在层间滑脱带内大量聚集。另外,区内成矿流体由则古朗运移至铜山附近时,受到滑覆构造体系的阻挡(秦志鹏等,2011),流体大量就地聚集,使铜山地区发生强烈的蚀变和矿化,控制了除主矿体外的其他小矿体的产出。

4 蚀变、矿化和成矿温度分带以及成矿中心的探求

4.1 蚀变、矿化分带特征

甲玛矿区内的围岩蚀变有热接触蚀变和热交代蚀变2种,发育角岩化及大理岩化、矽卡岩化、绢云母化、硅化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化、钾化、石膏化及泥化。野外观察及钻孔编录资料表明,甲玛矿床的蚀变分带较为明显:在水平方向上,①从北至南,蚀变由绢云母化为主,逐渐过渡为以角岩化、

带与成矿元素分带紧密对应,由深到浅依次为:辉钼矿→辉钼矿(黄铜矿)→黄铜矿(方铅矿+闪锌矿+辉钼矿)→黄铜矿(方铅矿+闪锌矿)→方铅矿+闪锌矿。成矿元素分带及矿化分带反映了由北东(深部)向南西(浅部)形成了高温至低温的元素组合及矿物组合的演化规律。

4.2 成矿温度分带以及成矿中心的探求

流体包裹体测温(周云,2010)显示,均一温度从甲玛矿区的北东(则古朗附近)向南西及北西方向逐渐降低(图4)。通过研究构造-流体成矿系统(秦志鹏,2010),认为成矿流体以则古朗地区为中心,分别向铜山、铅山及莫古郎地区运移。通过研究似埃达克岩与成矿的关系(秦志鹏,2010),认为硫及成矿物质的来源均与岩浆岩有关,推断岩浆成矿中心在该矿区北部的则古朗一带。通过蚀变带内细微的成分和结晶度变化的研究,推测在则古朗的深部可能存在着Mo矿化中心。因此,于勘查后期,本项目组打破常规,在则古朗附近布置了ZK1616钻孔进行深部探索,结果发现了厚逾250 m的矿体,在矽卡岩型似层状矿体的顶板围岩——角岩中也发现了独立的钼矿化,其品位变化稍大,局部也可圈出独立矿体,同时,还找到了以往未发现的钨矿化。

5 勘查的合理部署

甲玛矿区勘查部署的合理性主要体现为:分阶段、分地段,先易后难、先地表后深部。

(1) 预查阶段 充分利用前人已获之系统的区域和深部地球物理、区域地球化学及区域遥感资料,来进行区域地球物理场和地球化学场与成矿作用关系的分析,以及相应的构造-蚀变综合地质解译;同时,对冈底斯-念青唐古拉地体南缘的矿产种类、空间分布规律及时间演化规律做出详细的总结。发现甲玛矿床处于拉抗俄-墨竹工卡-邦铺NE向构造岩浆-成矿带上,区域找矿潜力巨大。

(2) 普查阶段 详细分析前人关于勘查区的地球物理及地球化学勘查资料,显示出铅山附近异常显著,由于该处的矽卡岩型矿体埋藏浅,上覆的第四系的厚度一般为几米至数十米,因此,本项目组决定勘查工作先从此处开始。同时,为初步了解区内地质、构造特征,并验证物化探资料或成果的可靠程度,以获得比较精确的地质资料,部署了地表踏勘填图、槽探、坑探和采空区编录等工作。

(3) 详查阶段 考虑到矿体的形态、产状、品位、厚度等变化特征以及矿体的延伸方向,结合该区的具体情况,沿用核实范围内NE30°方向布置勘探线,工程间距确定为(200~100) m×200 m,经过钻探基本查明了探矿权范围内矿体的产状,矿体的北边为矿体延伸方向,但延伸方向上未得到控制,在探矿权范围内,对矿体的分布范围、空间位置、矿体边界等已基本控制,矿体的地表矿化显示较弱,仅见较强的角岩化热蚀变,控制程度符合要求。同时,对矿区内30件辉钼矿样品进行了Re-Os同位素测定,否定了甲玛矿床为海底喷流型成矿的成因观点,进一步证实了本项目组找矿思路的可行性。

(4) 勘探阶段 由于矽卡岩型主矿体的边界尚未确定,本项目组决定实施工程加密,结果证实了勘查区内存在着连续的高品位矽卡岩型矿体。基于对矿床成因的新认识,本项目组认为,甲玛矿区的深部和外围存在巨大的找矿潜力,在矿区北部则古朗附近的深部,可能存在隐伏矿体,以后的勘查工作重点应逐步过渡到矿区深部及外围。

6 新勘查手段的有效运用

在甲玛矿床的勘查过程中,综合运用了地质方法、地球化学方法、地球物理方法、遥感方法和数学地质方法。在强调以地质方法为基础的前提下,有效使用了遥感方法和数学地质方法。

(1) 遥感方面(郭娜等,2010) 对ETM⁺图像和IKONOS图像提取成矿信息开展了对比研究,以确保护圈定找矿远景区的客观性和正确性。ETM⁺图像与IKONOS图像的蚀变、岩性解译结果一致,蚀变提取形态一致,均显示出矿区范围内确实存在很强的硅化及铁染、羟基蚀变异常。同时,引入ETM⁺图像TM6波段,合成746假彩色图像来进行构造信息的解译,确定了区域内各种大小断裂线性体108条、环形体构造2条。根据环形构造和大型断裂的导矿、容矿特征,认为在环的边缘、线环交叉的部位容易成矿,而且,驱龙、甲玛2个矿床正好位于甲玛环形构造的边缘位置。

(2) 数学地质方面(黎枫佶等,2010) 在完成模型数据库(包括钻孔井口三维坐标文件、钻孔测斜文件和岩矿芯样品化验文件)构建的基础上,应用MICROMINE软件模块建立了甲玛矿床(体)的三维立体模型、品位模型等,实现了矿床勘查模型的数字化

和可视化。甲玛 I 号矽卡岩型矿体的三维模型很好地反映了矿体的空间分布特征、矿体在延伸方向上厚度的变化趋势,矿体品位分布的三维立体模型显示出矿体连续性好,基本上没有无矿区域,铜多金属局部富集,首采区和矿体延伸方向上铜多金属元素富集现象明显,而且,模型反映出矿体向北、向东北尚未圈闭。2009 年的深部钻探资料证实了模型所反映的矿体的赋存情况及矿化的富集情况。

References

- Du G S, Yao P and Pan F C. 1998. Sedimentation-exhalation skarn and ore-formation the case of Jiamia copper-polymetallic deposit, Xizang [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. 113p (in Chinese).
- Guo N, Chen J P, Tang J X and Guo K. 2010. A study of the metallogenic prognosis for the periphery of Jiamia copper polymetallic ore, Tibet: Based on the RS method [J]. *Earth Science Frontiers*, 17 (4): 280-287 (in Chinese with English abstract).
- Hammarstrom J M, Kotlyar B B, Theodore T G, John J E, Doebrich D A, Nash J L, Carlson J T, Lee R R, Livo G K and Klein D P. 1995. Cu, Au, and Zn-Pb skarn deposits [A]. In: Bray E A, ed. Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models, Geological Survey Open-File Report [C]. U. S.: 90-111.
- Hochella M F. 1992. The Changing face of mineral-fluid interface geochemistry [A]. In: Aehart G B, Hulston J R, ed. Water-rock interaction [C]. Proceedings of The 9th International Symposium on Water-Rock Interaction. New Zealand: Taupo N Z. 7-12.
- Hou Z Q, Qu X M, Wang S X, Gao Y F, Du A D and Huang W. 2003. Re-Os ages of molybdenite in the Gangdese porphyry copper belt in south Tibet: Duration of mineralization and application of the dynamic setting [J]. *Science in China*, 33: 509-618 (in Chinese).
- Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239-248 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Qu X M, Yang Z S, Meng X J, Li Z Q, Yang Z M, Zheng M P, Zheng Y Y, Nie F J, Gao Y F, Jiang S H and Li G M. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting [J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629-651 (in Chinese with English abstract).
- Jones B K. 1993. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 48 (3): 359-365.
- Li F J. 2010. Constructing three-dimensional models and estimating reserves of Jiamia copper polymetallic deposit, Mozhuogongka County, Tibet: Based on Micromine technology (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Wang X W. Chengdu: Chengdu University of Technology. 19-50 (in Chinese with English abstract).
- Li G M and Rui Z Y. 2004. Diagenetic and mineralization ages for the porphyry copper deposits in the Gangdise metallogenic belt, Southern Xizang [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28 (2): 165-170 In press (in Chinese with English abstract).
- Li G M, Rui Z Y, Wang G M, Lin F C, Liu B, She H Q, Feng C Y and Qu W J. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiamia and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 481-489 (in Chinese with English abstract).
- Li X M, Peng L G and Ren Y X. 2003. On ore-search breakthrough for Baiyinchang type massive sulfide deposit [J]. *Northwestern Geology*, 36(2): 77-82 (in Chinese with English abstract).
- Li Z M, Xue C J, Wang X H, Tang H, Tu Q J, Teng J X and Li R S. 2007. Features of regional mineralization and analysis of the exploration development in the Eastern Kunlun Mountains [J]. *Geological Review*, 53(5): 708-718 (in Chinese with English abstract).
- Meng X J, Hou Z Q, Gao Y F, Huang W, Qu X M and Qu W J. 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in east Gangdese belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit [J]. *Mineral Deposit*, 22(3): 246-252 (in Chinese with English abstract).
- Meng X J, Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M and Huang W. 2004. The alteration zoning model of porphyry copper deposit in collisional orogen: Case studies of porphyry copper deposit in Gangdise belt, Xizang (Tibet) [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 201-214 (in Chinese with English abstract).
- Pan F C, Deng J, Yao P, Wang Q F and Liu Y X. 2002. The eruptive origins of copper and multi-metal deposits in the skarn in Jiamia, Tibet [J]. *Geoscience*, 16(4): 359-364 (in Chinese with English abstract).
- Pan T, Ma M S and Kang X R. 2001. Discovering of the Kendekeke (including its periphery) cobalt-poly-metallic ore deposit and significance, East Kunlun Mountain [J]. *Geology in China*, 28(2): 17-20 (in Chinese with English abstract).
- Peng H J, Wang X W, Müller Axel, Tang J X, Qing Z P, Hou L and Zhou Y. 2011. Magma mixing in Jiamia Cu-polymetallic deposit of Tibet: Evidence from quartz and feldspar phenocrysts [J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 249-265 (in Chinese with English abstract).
- Qin Z P. 2010. The diagenesis and mineralization of adakite-like rock form Jiamia copper-polymetallic deposit of Tibet (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Wang X W. Chengdu: Chengdu University of Technology. 7-54 (in Chinese with English abstract).
- Qin Z P, Wang X W, Dor J, Tang X Q, Zhou Y and Peng H J. 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon age of intermediate-acidic intrusive rocks in Jiamia of Tibet and its metallogenic significance [J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 353-362 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Li G M, Zhang L S and Wang L S. 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 145-152 (in Chinese with

- English abstract).
- Tang J X, Wang D H, Wang X W, Zhong K H, Ying L J, Zheng W B, Li F J, Guo N, Qin Z P, Yao X F, Li L, Wang Y and Tang X Q. 2010. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31 (4): 495-506 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Tang J X, Ying L J, Wang L Q and Qin Z P. 2011. Characteristics of the main ore minerals in the Jiama polymetallic deposit, Tibet [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 38 (1): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- Wang L L, Mo X X, Li B, Dong G C and Zhao Z D. 2006. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qulong Cu (Mo) ore deposit, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 1001-1008 (in Chinese with English abstract).
- Wang X W and Wang X D. 2002. Some diagnostic criteria for mineralized granite [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (2): 119-130 (in Chinese with English abstract).
- Williams H, Turner S, Kelley S and Harris N. 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism [J]. *Geology*, 29: 339-342.
- Xiao R G, Zhang H C, Chen H Q and Zhang Z H. 2001. Hydrothermal sedimentary rock and indicators of minerals and rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 8 (4): 379-382 (in Chinese with English abstract).
- Yao P and Du G S. 1999. The geochemistry and origin of the host rocks in the Jiama polymetallic ore deposit Xizang [J]. *Tethyan Geology*, (23): 46-56 (in Chinese with English abstract).
- Yao P, Zheng M H, Peng Y M, Li J G, Su D K and Fan W Y. 2002. Sources of ore-forming material and the genesis of the Jiama copper and polymetallic deposit in Gangdise island-arc belt, Xizang [J]. *Geological Review*, 48 (5): 468-479 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Tang J X, Wang D H, Chang Z S, Qu W J and Zheng W B. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite in skarn from the Jiama copper polymetallic deposit of Tibet and its metallogenic significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28 (3): 265-268 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X, Chang Z S, Qu W J, Zheng W B and Wang H. 2010. Re-Os dating of molybdenite from the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its metallogenic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (8): 1165-1174 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D. 1992. Discussions of the approach to science prospecting [J]. *Shaanxi Geological Science and Technology Information*, 17 (3): 1-10 (in Chinese).
- Zheng W B, Chen Y C, Tang J X, Song X, Lin B, Gui X G and Ying L J. 2010a. Research and application of copper mineralization enrichment regularity of Jiama polymetallic copper deposit in Tibet [J]. *Metal Mine*, 404 (2): 87-91 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W B, Cheng Y C, Song X, Tang J X, Ying L J, Li F J and Tang X Q. 2010b. Element distribution of Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 29 (5): 775-782 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y. 2010. Characteristic and evolution of ore-forming fluids from Jiama polymetallic copper deposit, Mozhugongka County, Tibet (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Wang X W. Chengdu: Chengdu University of Technology. 60-83 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Wang X W, Tang J X, Qin Z P, Peng H J, Li A G, Yang K, Wang H, Li J and Zhang J C. 2011. The composition of single silicate melt inclusions in the quartz phenocrysts in porphyries from Jiama polymetallic copper deposit, Tibet [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 38 (1): 92-101 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜光树,姚 鹏,潘凤雏. 1998. 喷流成因矽卡岩与成矿——以西藏甲玛铜多金属矿床为例 [M]. 成都: 四川科学技术出版社. 113 页.
- 郭 娜,陈建平,唐菊兴,郭 科. 2010. 基于 RS 技术的西藏甲玛铜多金属矿外围成矿预测研究 [J]. *地学前缘*, 17 (4): 280-287.
- 侯增谦,曲晓明,王淑贤,高永丰,杜安道,黄 卫. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用 [J]. *中国科学*, 33: 509-618.
- 侯增谦,高永丰,孟祥金,曲晓明,黄 卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带 埃达克质斑岩成因与构造控制 [J]. *岩石学报*, 20 (2): 239-248.
- 侯增谦,曲晓明,杨竹森,孟祥金,李振清,杨志明,郑绵平,郑有业,聂凤军,高永丰,江思宏,李光明. 2006. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用 [J]. *矿床地质*, 25 (6): 629-646.
- 黎枫信. 2010. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿三维模型构建和资源量估算——基于 MICROMINE 的应用 (硕士论文) [D]. 导师: 汪雄武. 成都: 成都理工大学. 19-50.
- 李光明,芮宗瑶. 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄 [J]. *大地构造与成矿学*, 28 (2): 165-170.
- 李光明,芮宗瑶,王高明,林方成,刘 波,余宏全,丰成友,屈文俊. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义 [J]. *矿床地质*, 24 (5): 481-489.
- 李向民,彭礼贵,任有祥. 2003. 白银厂式块状硫化物矿床找矿突破的反思 [J]. *西北地质*, 36 (2): 77-82.
- 李智明,薛春纪,王晓虎,汤 桦,涂其军,滕家欣,李荣社. 2007. 东昆仑区域成矿特征及有关找矿突破问题分析地 [J]. *地质论评*, 53 (5): 708-718.
- 孟祥金,侯增谦,高永丰,黄 卫,曲晓明,屈文俊. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限: 帮铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据 [J]. *矿床地质*, 22 (3): 246-252.
- 孟祥金,侯增谦,高永丰,曲晓明,黄 卫. 2004. 碰撞造山型斑岩铜矿蚀变分带模式——以西藏冈底斯斑岩铜矿带为例 [J]. *地学前缘*, 11 (1): 201-214.
- 潘凤雏,邓 军,姚 鹏,王庆飞,刘玉祥. 2002. 西藏甲玛铜多金属矿

- 床砂卡岩的喷流成因[J]. 现代地质, 16(4): 359-364.
- 潘 彤, 马梅生, 康祥瑞. 2001. 东昆仑肯德可克及外围钴多金属矿找矿突破的启示[J]. 中国地质, 28(2): 17-20.
- 彭惠娟, 汪雄武, Axel Müller, 唐菊兴, 秦志鹏, 侯 林, 周 云. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿区成矿斑岩的岩浆混合作用: 石英及长石斑晶新证据[J]. 矿床地质, 30(2): 249-265.
- 秦志鹏. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床似埃达克岩的成岩成矿作用(硕士论文)[D]. 导师: 汪雄武. 成都: 成都理工大学. 7-54.
- 秦志鹏, 汪雄武, 多 吉, 唐晓倩, 周 云, 彭惠娟. 2011. 西藏甲玛中酸性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义[J]. 矿床地质, 30(2): 353-262.
- 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 王龙生. 2004. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]. 地学前缘, 11(1): 145-152.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭 娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李 磊, 王 友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征和及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 王 焕, 唐菊兴, 应立娟, 王立强, 秦志鹏. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 103-112.
- 王亮亮, 莫宣学, 李 冰, 董国臣, 赵志丹. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 22(4): 1001-1008.
- 汪雄武, 王晓地. 2002. 花岗岩成矿的几个判别标志[J]. 岩石矿物学杂志, 21(2): 119-130.
- 肖荣阁, 张汉城, 陈卉泉, 张宗恒. 2001. 热水沉积岩及成矿岩石标志[J]. 地质前缘, 8(4): 379-382.
- 姚 鹏, 杜光树. 1999. 西藏甲玛多金属矿床容矿岩石的地球化学特征及其成因初步研究[J]. 特提斯地质, (总第 23 期): 46-56.
- 姚 鹏, 郑明华, 彭勇民, 李金高, 粟登奎, 范文玉. 2002. 西藏冈底斯岛弧带甲玛铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究[J]. 地质论评, 48(5): 468-479.
- 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝. 2009. 西藏甲玛铜多金属矿床砂卡岩中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 265-268.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝, 王 焕. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 84(8): 1165-1174.
- 赵鹏大. 1992. 谈谈科学找矿的途径[J]. 陕西地质科技情报, 17(3): 1-10.
- 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 宋 鑫, 林 彬, 桂晓根, 应立娟. 2010a. 西藏甲玛铜多金属矿床铜矿化富集规律研究及应用[J]. 金属矿山, 404(2): 87-91.
- 郑文宝, 陈毓川, 宋 鑫, 唐菊兴, 应立娟, 黎枫信, 唐晓倩. 2010b. 西藏甲玛铜多金属矿元素分布规律及地质意义[J]. 矿床地质, 29(5): 775-782.
- 周 云. 2010. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿成矿流体特征及演化(硕士论文)[D]. 导师: 汪雄武. 成都: 成都理工大学. 60-83.
- 周 云, 汪雄武, 唐菊兴, 秦志鹏, 彭惠娟, 李爱国, 杨 科, 王 华, 李 炯, 张继超. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿斑岩中单个熔融包裹体的成分[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 92-101.