

斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型

——以西藏甲玛超大型矿床为例*

林彬¹, 唐菊兴^{1**}, 唐攀², 郑文宝¹, Greg Hall³, 陈国良⁴, 张忠坤⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部深地资源成矿作用与矿产预测重点实验室, 北京 100037; 2 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 3 中国黄金国际资源有限公司, 北京 100011; 4 西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850212)

摘要 青藏高原冈底斯成矿带诸多大型-超大型斑岩成矿系统的勘查和研究成果显示, 传统的陆缘弧或岛弧背景的成矿作用模型不能更好的用于指导碰撞造山背景下斑岩成矿系统的勘查实践。文章以甲玛超大型矿床为实例, 基于十余年的勘查实践, 通过对不同类型矿体蚀变和矿化结构的精细解剖和成岩成矿年代学的系统分析, 建立造山背景下斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型。同时, 系统总结甲玛矿床地质特征, 阐述成矿作用模型中地层、构造、岩浆等基础地质要素, 并详细解析斑岩型铜矿体、矽卡岩型铜多金属矿体、角闪型铜钼矿体、Manto型富铜铅锌矿体以及独立金矿体所构成的多元矿体结构特征。最后, 揭示甲玛斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型与传统模型的差异, 提出其对相同构造背景下斑岩成矿系统勘查评价的启示。

关键词 地质学; 斑岩成矿系统; 多中心复合成矿作用模型; 甲玛, 冈底斯, 西藏
中图分类号 P618.41; P618.65 **文献标志码**: A

Polycentric complex mineralization model of porphyry system: A case study of Jiama superlarge deposit in Tibet

LIN Bin¹, TANG JuXing¹, TANG Pan¹, ZHENG WenBao², GREG Hall³, CHEN GuoLiang⁴ and ZHANG ZhongKun⁴

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan China; 3 China Gold International Resources Co., Ltd., Beijing 100011, China; 4 Tibet Huatailong Ming Co., Ltd., Lhasa, 850212, Tibet, China)

Abstract

The traditional mineralization model of the porphyry system under the setting of continental arc or island arc cannot be applied to the exploration in the background of collision orogeny favorably, as shown by the exploration and research results of many large or superlarge porphyry deposits in the Gangdise metallogenic belt in the Tibetan Plateau. For this reason, taking the Jiama superlarge deposit as an example and based on the exploration of more than ten years, the authors constructed the polycentric complex mineralization model of porphyry mineralization system under the orogeny setting based on analyzing the geological structure of different types of orebody alteration and mineralization structure and a systematic analysis of geochronology. In addition, the au-

* 本文得到国家重点研发计划-深地专项(编号:2018YFC0604101)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费项目(编号:SYSCR2019-02)、西藏自治区科技计划项目(编号:XZ201901-GB-24)和国家自然科学基金项目(编号:41902097)联合资助

第一作者简介 林彬,男,1987年生,助理研究员,主要从事青藏高原矿产勘查和综合研究。Email: linbinlx@sina.com

** 通讯作者 唐菊兴,男,1963年生,研究员,主要从事矿产勘查和综合研究。Email: tangjuxing@126.com

收稿日期 2019-04-12; 改回日期 2019-08-22。秦思婷编辑。

thors presented the basic geological units of this model, such as strata, structure, magma according to the geological characteristics of the Jiama deposit and revealed the structures of the porphyry Mo-Cu orebody, skarn Cu polymetallic orebody, hornfels Cu-Mo ore-body, Manto Cu-Pb-Zn rich orebody and independent gold orebody in the Jiama deposit, respectively. Finally, the authors explored the difference between the polycentric complex mineralization model of Jiama and the traditional model of porphyry system, and gave some suggestions for the exploration and prospecting of the porphyry system under the collision orogeny setting.

Key words: geology, porphyry system, polycentric complex mineralization model, Jiama, Gangdise, Tibet

斑岩成矿系统是世界上最重要的矿床类型之一,主要指与中酸性侵入体有关的,含多种矿化类型的成矿系统 (Richards, 2003; 2014; Sillitoe, 2010)。它常因成矿规模大、矿体埋藏浅、矿化品位均匀,易采选等特征,备受矿山企业青睐 (Cooke et al., 2005)。同时,斑岩成矿系统为全球矿业领域提供近75%的铜,50%的钼以及大量的铅锌等 (Sillitoe, 2010)。前人曾基于安第斯山成矿带大量研究实例,构建了经典的斑岩成矿系统模型 (Sillitoe, 2010),包括深部的斑岩型矿体、与碳酸盐岩地层接触形成的矽卡岩型矿体,以及斑岩体顶部或外围形成的高硫型或低硫型浅成低温热液型矿体 (毛景文等, 2014)。多年来,该模型已经成为众多科研机构研究斑岩成矿作用理论的典范,也是国际矿山企业指导勘查实践的标杆 (Halley et al., 2015)。

近年来,随着国家基础地质调查工作的深入和企业勘查资金的不断投入,在青藏高原南部冈底斯成矿带新发现多个大型-超大型斑岩型矿床,如驱龙斑岩型铜矿床 (Yang et al., 2009)、甲玛斑岩型铜多金属矿床 (Zheng et al., 2016)、邦铺斑岩型钼铜矿床 (Wang et al., 2015)等,构成了特提斯成矿带东段重要的斑岩成矿带 (Hou et al., 2015)。大量的年代学、岩石学、同位素地球化学以及构造动力学研究表明,冈底斯成矿带斑岩铜矿系统为中新世 (13~17 Ma) 中酸性岩浆活动的产物 (Yang et al., 2016),其成矿作用背景不同于经典的俯冲弧环境,而是印度板块-欧亚板块陆-陆碰撞造山后的伸展环境 (Wang et al., 2018)。从而,西藏冈底斯成矿带作为碰撞造山斑岩成矿系统的典型代表,成为矿床学家或矿床勘查学家关注和研究的热点 (唐菊兴等, 2012; 张泽斌等, 2019)。

随着研究的不断深入,逐步发现产于碰撞造山环境的斑岩成矿系统 (如甲玛),存在诸多不同于经典斑岩成矿系统模型之处,如:① 赋矿围岩为沉积岩而非传统的火山岩;② 顶部发育大规模角岩型矿化和蚀变,而缺乏浅成低温热液成矿作用 (唐菊兴

等, 2010);③ 具多中心复合成矿特征而非单一成矿系统。从而说明,传统的弧背景下斑岩成矿系统成矿作用模型,可能并不严格符合碰撞造山背景下斑岩矿床的勘查实际 (唐菊兴等, 2009)。

那么,如何基于已有研究成果,充分利用青藏高原的天然优势,创建适用于碰撞造山环境的斑岩成矿系统模型,是当前基础矿床学创新研究以及勘查实践中,亟需共同解决的科学难题。本文以冈底斯成矿带东段甲玛超大型斑岩成矿系统为例,基于十余年的勘查和研究成果,详细解剖其矿床地质特征,利用最新的勘查和研究进展,创建甲玛斑岩成矿系统“多中心复合成矿作用”模型,进一步深化碰撞造山背景下斑岩成矿系统理论,为碰撞造山背景下斑岩成矿系统的深部探测及外围勘查提供参考依据。

1 区域地质概况

冈底斯成矿带位于青藏高原南部,指产于冈底斯岩浆弧中的铜金铁钼钨锑铅锌硼成矿带,矿床主要集中在谢通门县至工布江达县之间,长约400 km,宽约50 km,与冈底斯岩浆弧范围相当 (唐菊兴等, 2012)。成矿带内重要矿床类型,由古到新,主要包括:① 与洋壳俯冲花岗质岩类有关的Cu-Au矿床,如雄村;② 与俯冲-碰撞弧花岗岩有关的Cu-Fe-Pb-Zn矿床,如尼雄、日阿、拉屋、亚贵拉等;③ 与碰撞造山后期伸展背景花岗质斑岩有关Cu-Mo-Au矿床,如厅宫、冲江、甲玛、驱龙、邦铺等 (徐志刚等, 2008)。其中,与碰撞造山后期伸展背景下形成的斑岩型矿床是冈底斯成矿带的突出代表 (唐菊兴等, 2014a)。

区域出露的地层主要以古元古代—中元古代冈底斯岩群和念青唐古拉岩群为基底,上覆地层包括古生代海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积建造,局部夹双峰式火山岩建造,以及中生代巨厚的弧火山岩建造、碳酸盐岩建造和碎屑岩建造组合。区内发育典型的弧火山岩,最早始于石炭纪,代表其构造体制从

被动大陆边缘向活动大陆边缘转换,并在中生代发展成为多岛弧-盆体系(潘桂棠等,2006;唐菊兴等,2012)。然而,就冈底斯成矿带成矿作用而言,由雅鲁藏布江洋的俯冲-消减-闭合以及印度大陆与欧亚大陆碰撞造山,所引发的广泛构造-岩浆活动,是控制冈底斯成矿带成岩成矿作用的关键,也为碰撞造山斑岩成矿系统的形成提供了良好地质条件(侯增谦,2010)。

2 矿床地质特征

甲玛矿床位于冈底斯成矿带东段,拉萨地块南缘,雅鲁藏布江缝合带北侧,区内出露的地层简单,从古到新依次为:①上侏罗统多底沟组(J_3d):属于台缘生物礁相碳酸盐沉积的产物,主要为灰白色-灰色块状结晶灰岩,夹少量薄层灰岩、泥灰岩、板岩、粉砂岩、细砂岩等,厚度变化较大,约196~1741 m;②下白垩统林布宗组(K_1l):是矿区最主要的地层,主要为灰黑色板岩、粉砂岩,夹灰白色石英砂岩、细砂岩,富含碳质和黄铁矿,局部夹有无烟煤层及煤线,厚度变化为112~1495 m,与下伏多底沟组为整合接触;③第四系:局部沿沟谷、河谷分布的残坡积物(图1)。

矿区内受甲玛-卡军果推覆构造体系控制明显,局部(铜山)发育滑覆构造(钟康惠等,2012)。其中,甲玛-卡军果推覆构造主要指矿区由北向南“叠缩式”的逆冲推覆褶皱带,控制着甲玛矿区I号矽卡岩主矿体的产出形态。而铜山滑覆构造属于整个推覆构造体系的重要组成部分,主要指矿区东南部铜山-布朗沟-莫古郎沟一带,受推覆形成的铜山高位岩块,由于重力失稳而反向滑覆,从而形成滑覆构造体以及次级褶皱和裂隙,该滑覆构造控制着矿区内II号矽卡岩矿体的产出形态(唐攀等,2017)。

甲玛矿区地表岩浆岩出露面积较小,以中酸性岩浆活动为主,多呈隐伏岩枝侵位。岩石类型主要为中新世中酸性侵入岩,局部有少量的基性岩脉。其中,中酸性侵入岩主要包括(石英)闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩(Zheng et al., 2016)。其中,二长花岗斑岩、花岗斑岩与铜矿化密切相关,而花岗闪长斑岩、部分闪长玢岩则与铜矿化密切相关。基性岩脉则主要指矿区内产出的暗色煌斑岩细脉以及矿区外围产出的少量辉绿岩脉,多为成矿后岩浆活动的产物(秦志鹏,2013)。

基于现有矿权设置和勘查成果,甲玛矿区包括甲玛采矿权和甲玛外围探矿权。其中,甲玛采矿权空间上位于甲玛外围探矿权内,二者结合后,可细分为3个矿段,即主矿段、南坑矿段和则古朗北矿段。此外,甲玛矿区西南侧另有单独的八一牧场探矿权,目前仅开展少量的探矿工作。甲玛矿区作为目前矿山勘查及研究的核心区域,各矿段的主要矿体地质特征如下:

(1)主矿段:位于甲玛矿区中部,主要包括产于层间滑脱带I号矽卡岩矿体和深部隐伏的斑岩型矿体及其顶部的角岩型矿体。其中,I号矽卡岩矿体,走向近北西-南东向,延长约3000 m,倾向北东,长约2000 m。矿体北东延伸方向尚未控制边界。矿体整体呈似层状、厚板状产于多底沟组和林布宗组之间的滑脱带,浅部矿化以铅锌为主,深部主要为铜钼矿化(图2a)。矿石类型主要为矽卡岩型铜钼矿石,少量矽卡岩型铅锌矿石,局部富含少量金矿石和银矿石(图2b)。隐伏斑岩型矿体,主要产于主矿段中心(钻孔416~3216),呈宽大岩枝侵位,矿体产状陡立,整体呈柱状,水平延伸约1600 m,垂向延伸约800 m,深部并未完全控制矿体边界。矿石类型以细脉-浸染状斑岩铜钼矿石为主(图2c)。角岩型矿体,则产于斑岩型矿体顶部围岩中,主要受岩浆热液烘烤、蚀变影响,矿体呈“筒状”产出,产状陡立,水平方向延伸约1500~2000 m,垂向上延伸可达900 m。矿石类型主要以浸染状、脉状的角岩铜钼矿石(图2d)。此外,主矿段西北部,牛马塘地区(钻孔4504)发育少量产于石英闪长玢岩脉中的金矿体,长约100 m,宽约10~13 m,主要呈石英-硫化物脉产出。

(2)南坑矿段:位于甲玛矿区南部,主要指II号矽卡岩矿体(邹兵等,2019)。该矿体产于铜山滑覆构造体中,呈厚大板状,矿体走向近北西向-南东向,延伸约1000 m,倾向北东,延伸大于700 m,倾向较陡,多大于 50° 。矿化主要为富铜、铅锌矿化。矿石类型为团块状、块状矽卡岩富铜铅锌矿石。此外,在南坑矿段钻孔8806附近,可见产于矽卡岩破碎带中的脉状金矿体,发育强硅化蚀变,富含磁黄铁矿等硫化物。

(3)则古朗北矿段:位于甲玛矿区东北方,目前钻孔施工较少,矿体控制程度较低,主要在钻孔836中揭示厚大的斑岩型铜钼矿体,厚度约750 m,铜平均品位0.2%,钼平均品位0.03%。同时,在该斑岩体附近也探获角岩型铜钼矿体和矽卡岩型矿体。但均为单孔揭露,矿体产状尚不明确。

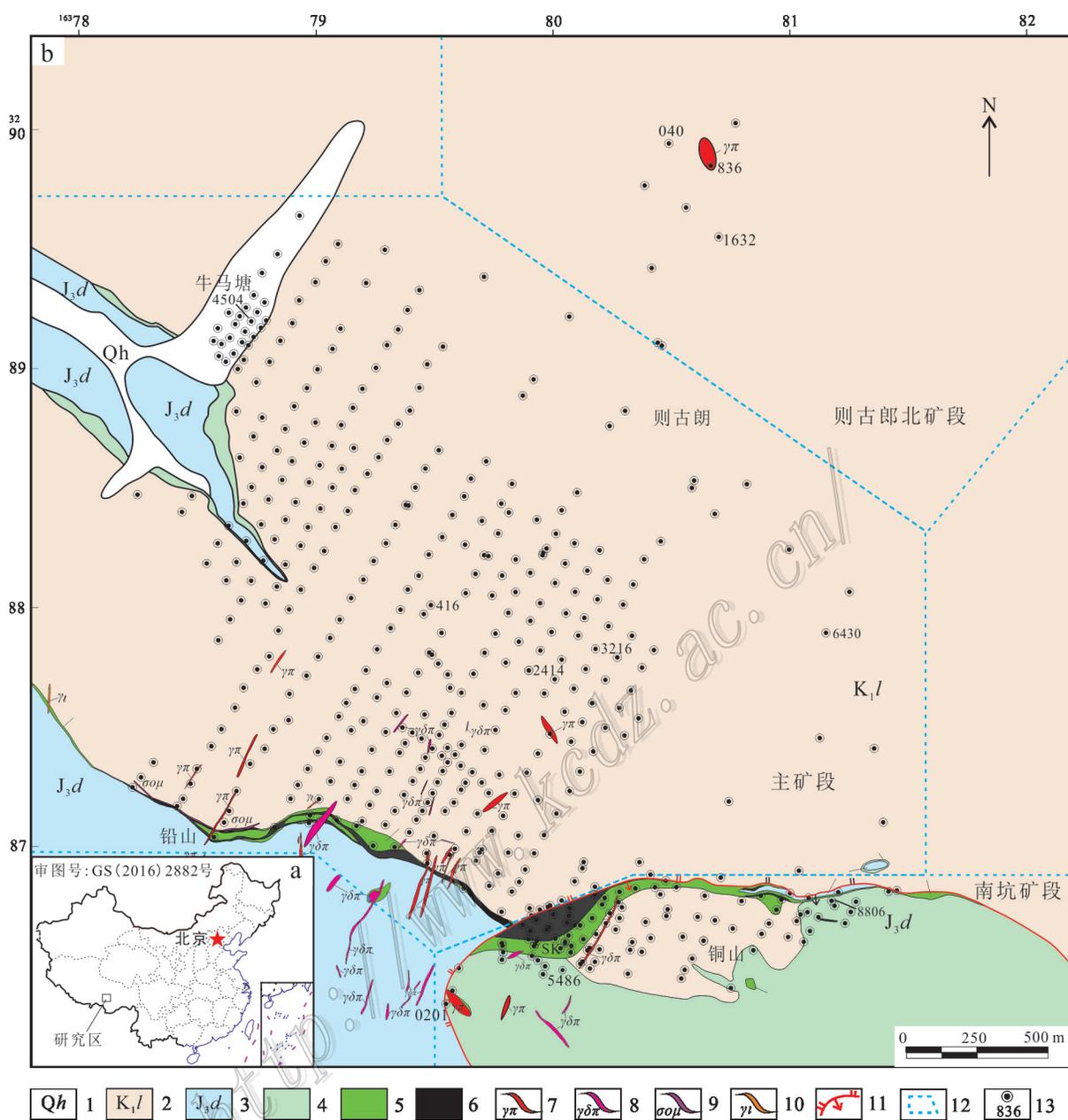


图 1 甲玛矿区地理位置(a)及地质简图(b)

1—第四系沉积物;2—下白垩统林布宗组砂岩、板岩、角岩;3—上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩;4—矽卡岩化大理岩;5—矽卡岩;6—矽卡岩型矿体;7—花岗斑岩脉;8—花岗闪长斑岩脉;9—石英闪长玢岩脉;10—细晶岩脉;11—滑覆构造断裂;12—矿段范围;13—钻孔及编号

Fig. 1 Location (a) and geological map (b) of the Jiama deposit

1—Quaternary sediments; 2—Sandstone, slate and hornfels of Linbuzong Formation in Lower Cretaceous; 3—Limestone and marble of Duodigou Formation in Upper Jurassic; 4—Skarn marble; 5—Skarn; 6—Skarn orebody; 7—Granite porphyry dikes; 8—Granodiorite porphyry dikes; 9—Quartz-diorite porphyry dikes; 10—Aplite dike; 11—Slip fault; 12—Range of ore block; 13—Drill hole and its serial number

3 矿区勘查进展

甲玛矿床的勘查评价工作可细分为 3 个阶段:

第一阶段(2006 年以前):甲玛矿区仅发现地表出露的矽卡岩型铅锌矿体,产于林布宗组砂、板岩和多底沟组的灰岩、大理岩之间。其中,勘查评价工作主要集中于地表出露的铅锌矿体,勘查类型以“海底

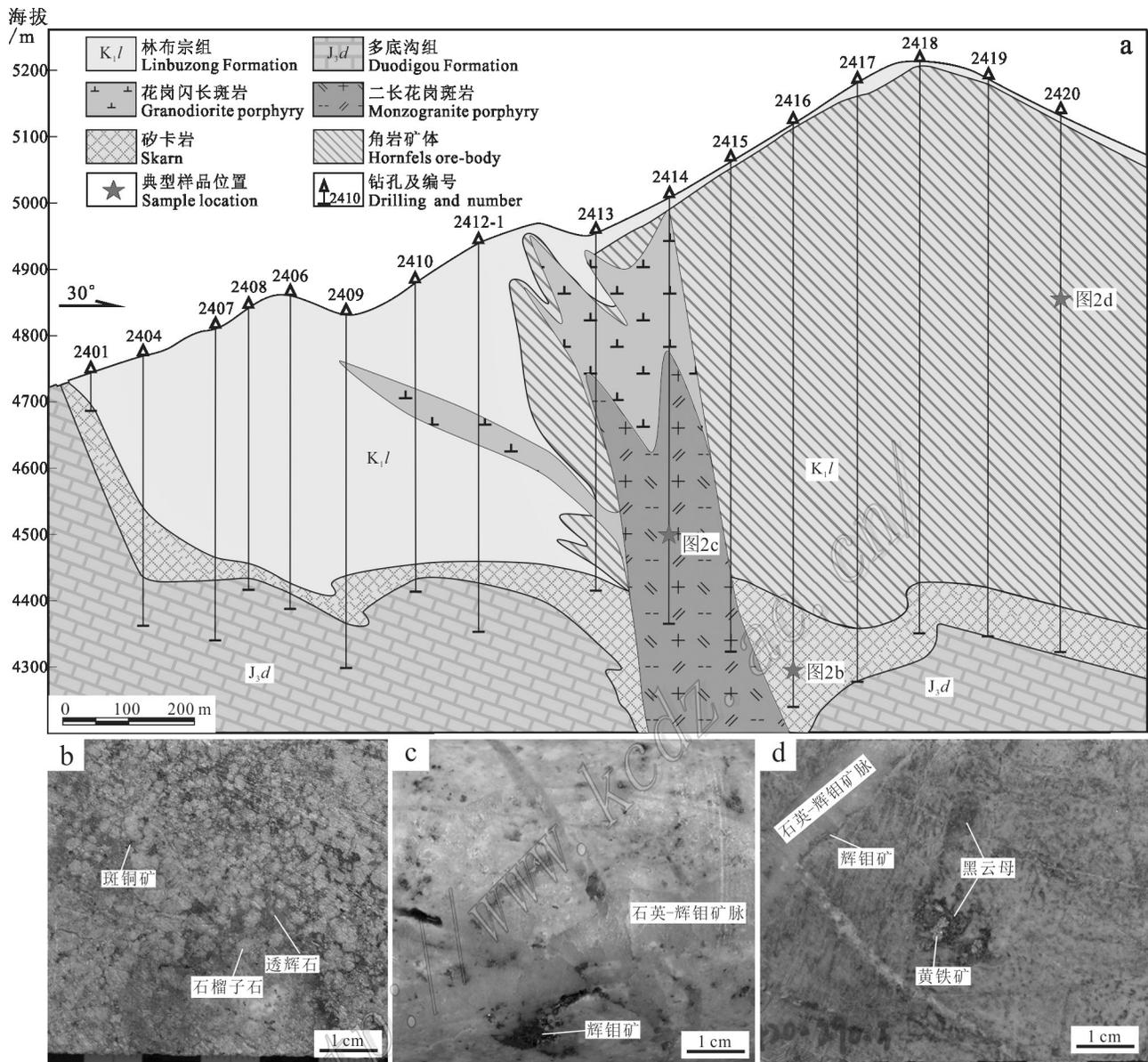


图2 甲玛矿区主矿段24号剖面(a)及典型矿化照片(b~d)

b. 透辉石榴子石矽卡岩; c. 含石英-辉钼矿脉的斑岩; d. 发育石英-辉钼矿脉的黑云母角岩

Fig. 2 No. 24 geological section (a) in main ore block of the Jiama deposit and typical mineralization photos (b~d)

b. Diopside garnet skarn; c. Quartz-molybdenite veins in porphyry; d. Quartz-molybdenite veins in biotite hornfels

喷流沉积型”矿床为主(唐菊兴等,2011)。

第二阶段(2006年至2016年):在矿区内(主矿段)开展了大比例尺的地质填图和物、化探调查,初步判定甲玛矿区中部存在良好的矿化异常,深部可能存在隐伏岩脉。进一步钻探验证揭示,甲玛矿区存在典型的“多元”矿体结构,即浅部为产于斑岩体顶部的角岩型铜钼矿体,中部为产于层间扩容带的矽卡岩型铜多金属矿体,深部为与隐伏侵入岩脉有关的斑岩型铜钼矿体,以及在铜山滑覆体中发现厚

大的矽卡岩型富铜铅锌矿体、局部产于构造破碎带中的脉状金矿体(唐菊兴等,2013)。

第三阶段(2017年至今):基于甲玛矿区外围和八一牧场矿区新完成的1:1万土壤和岩石地球化学测量结果,除甲玛主矿段异常和南坑矿段异常外,在矿区外围新圈定多个矿化异常,如则古朗北异常、象背山异常、莫古朗异常。其中,2017年在则古朗北异常区进行钻探验证时,新发现厚大的斑岩型矿体和角岩型矿体,2018年则陆续发现近端矽卡岩型矿体,

从而进一步推动了甲玛矿区外围的详查工作。此外,在甲玛矿区主矿体范围内,陆续发现厚大斑岩型矿体和近端矽卡岩矿体,进一步扩大了主矿段的资源储量规模。

4 综合研究进展

4.1 蚀变与矿化结构

目前,甲玛矿区内研究程度最高的是主矿段,该矿段内赋存着矽卡岩型、角岩型和斑岩型等多种矿体类型。

作为目前资源储量的核心组成部分,Ⅰ号矽卡岩矿体中矽卡岩矿物呈现清晰的垂向分带和水平分带现象。其中,垂向分带在靠近侵入体附近的厚大矽卡岩中较为明显,从矿体的顶部到底部,依次可细分为:硅化黑云母角岩→绿泥石化-绿帘石化角岩→石榴子石-绿泥石化角岩→透辉石-石榴子石矽卡岩→石榴子石矽卡岩→硅灰石-石榴子石矽卡岩→石榴子石-硅灰石矽卡岩→硅灰石矽卡岩→矽卡岩化大理岩→大理岩(冷秋锋等, 2015; 冷秋锋, 2016)(图2)。其中,硅化黑云母角岩主要发育细脉浸染状的黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿;绿泥石化-绿帘石化角岩则多以石英-黄铁矿脉、石英-辉钼矿脉为主,少量浸染状黄铜矿;矽卡岩化角岩则发育大量的石英-辉钼矿脉,呈现富钼的特征;透辉石-石榴子石矽卡岩则多沿石榴子石颗粒间结晶他形的黄铜矿和细粒辉钼矿;石榴子石矽卡岩中发育大量他形黄铜矿、部分被斑铜矿交代,局部发育辉铜矿、黝铜矿以及少量白钨矿;硅灰石-石榴子石矽卡岩主要为他形浸染状的斑铜矿和黄铜矿;硅灰石矽卡岩则以他形斑铜矿为主,见少量黄铜矿;矽卡岩化大理岩是指大理岩中局部发育矽卡岩化细脉,靠近脉体两侧发育细粒浸染状的斑铜矿;大理岩中矿化或无明显矿化。水平分带,指从侵入体内到远端,依次分为内矽卡岩→透辉石-石榴子石矽卡岩→石榴子石矽卡岩的分带。其中,内矽卡岩是指中酸性侵入体中出现石榴子石等矽卡岩矿化,主要发育浸染状黄铁矿、黄铜矿;透辉石-石榴子石矽卡岩则发育细粒浸染状的黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿以及黝铜矿、辉铜矿,或少量白钨矿;石榴子石矽卡岩则分布范围最广,从岩体附近向外,石榴子石颜色由棕色逐步过渡为绿色或浅绿色,钙铁石榴子石与钙铝石榴子石的比值逐步降低,金属矿物也由辉钼矿、黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿逐步过渡为闪锌矿、方铅矿的矿物组合。

角岩矿体产于矽卡岩矿体的上部,或隐伏侵入于斑岩体顶部围岩中。主矿段中,角岩矿体的蚀变均具有强硅化特征,远端呈现弱硅化的碳质板岩特征。同时,强硅化的角岩中,又可见绿泥石化、绿帘石化、黑云母化等蚀变。其中,黑云母化多呈断续的细脉状、斑点状产出,广泛分布于角岩矿体中,靠近斑岩体可见诸多不规则状的石英-黑云母脉。绿泥石化和绿帘石化则主要位于角岩矿体底部,靠近矽卡岩矿体,通常与石英共生,产于石英脉体两侧或独立呈脉状产出。角岩中,金属矿化整体较为简单,受裂隙系统控制较为明显,上部矿化主要以细粒浸染状、断续细脉状的黄铜矿、黄铁矿为主,下部则发育大规模的石英-辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉体系统(图2)。石英-硫化物脉体的产状和密度与深部隐伏斑岩体侵位密切相关,越靠近侵入体,脉体产状越陡,密度越大,矿化也越强。

斑岩矿体,主要产于隐伏侵入的中酸性斑岩体中。浅部斑岩体蚀变较强,以绢英岩化、泥化蚀变为主,伴有明显的石英-辉钼矿、石英-黄铁矿-黄铜矿矿化。深部蚀变逐渐变弱,局部可见少量的黑云母细脉、钾长石细脉或不规则的石英细脉,矿化主要为石英-辉钼矿细脉。

南坑矿段主要为Ⅱ号矽卡岩矿体,矽卡岩矿物分带不明显,主要为石榴子石矽卡岩和石榴子石-硅灰石矽卡岩,局部夹不规则状的硅化角岩块体、矽卡岩化大理岩块体。矽卡岩矿体中多处出现破碎带或氧化裂隙,可能是滑覆构造活动的产物。金属矿物主要为斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿以及少量的辉钼矿。其中,斑铜矿多呈他形不规则状产于石榴子石-硅灰石矽卡岩矿物粒间,或呈团斑状、块状产出;闪锌矿、方铅矿以及少量黄铜矿则多呈团块状、囊状产于矽卡岩化大理岩或大理岩中(图3)。南坑矿段西南部的花岗斑岩或细晶岩脉中多处可见UST结构,同时发育大量的石英网脉,可能暗示南坑矿段的成矿作用与西南部的热液流体有关(图3)。

则古朗北矿段,虽然目前只有少数钻孔揭露,但其蚀变和矿化规模不容小觑。以836钻孔为例,345 m以下发育大规模花岗斑岩岩脉,深部仍未控制,发育强烈的绢英岩化和泥化蚀变,同时产出大量石英-辉钼矿脉和石英-黄铜矿-黄铁矿脉,从而形成厚大的斑岩型铜钼矿体(大于750 m)。同时,该斑岩体外围已发现富铜钼矽卡岩矿体和厚大的角岩型矿体。

4.2 成岩成矿作用时代分析

成岩成矿作用时限,是探究斑岩成矿系统成矿

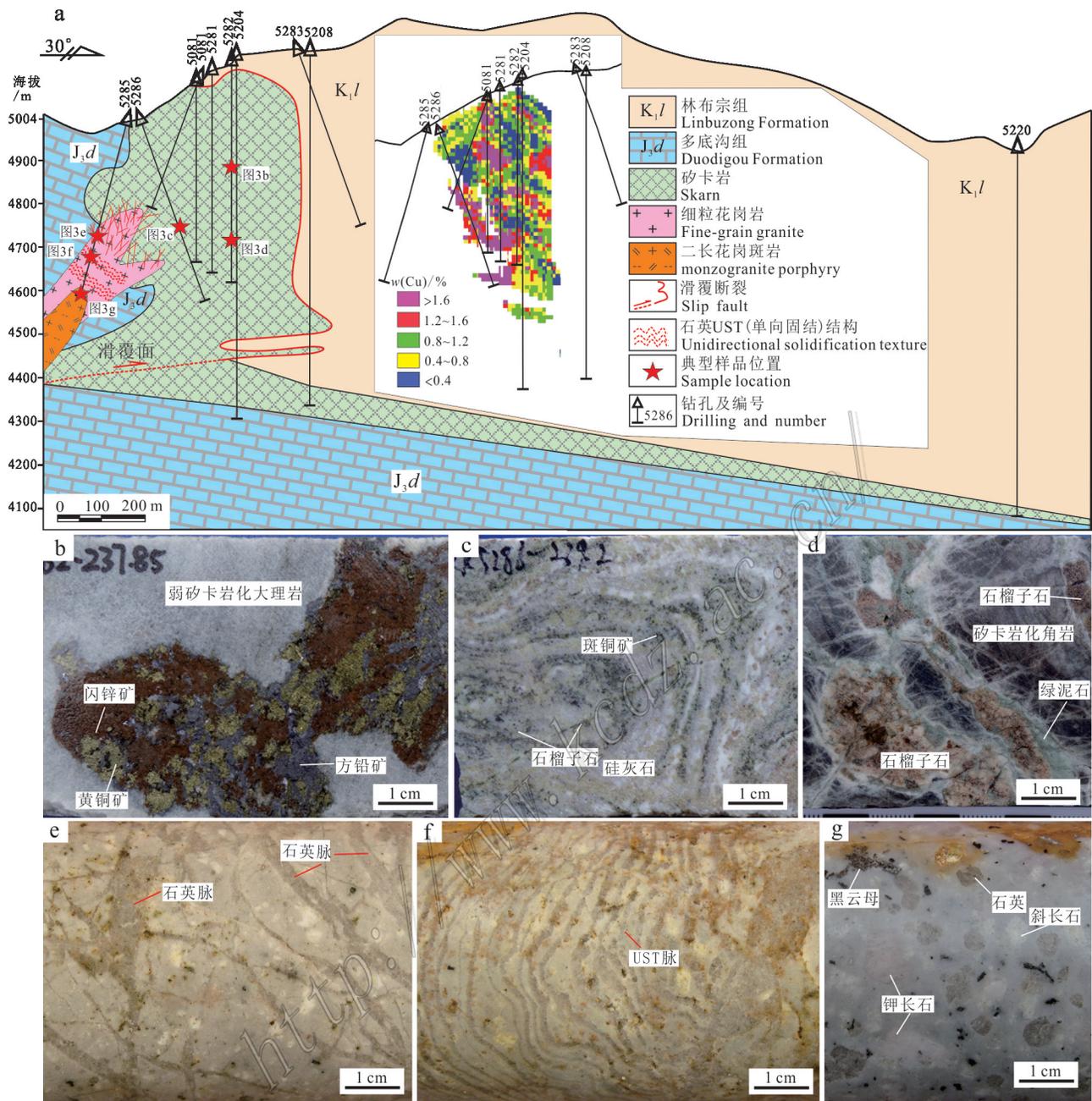


图3 甲玛矿区南坑矿段52号剖面(a)及典型矿化照片(b~g)

b. 矽卡岩化大理岩中产生的“囊状”富铜铅锌矿化;c. 揉皱变形的富铜石榴子石硅灰石矽卡岩;d. 含石榴子石脉的矽卡岩化角岩;

e. 细粒花岗岩中石英细脉;f. 细粒花岗岩中石英UST结构;g. 二长花岗斑岩
Fig. 3 No. 52 geological section (a) of Nankeng ore block of the Jiama deposit and typical mineralization photos (b~g)
b. Cystic Cu-Pb-Zn rich mineralization in skarn marble; c. Crumpled Cu-rich garnet wollastonite skarn; d. Garnet vein in skarn hornfels;
e. Quartz veins in fine grained granite; f. Unidirectional solidification texture of quartz in fine grained granite; g. Monzonitic granite porphyry

作用机理的关键。主矿段钻孔编录结果显示,矿区内花岗斑岩侵位时限相对较早,常被闪长玢岩、花岗闪长斑岩和二长花岗斑岩岩脉穿切,而二长花岗斑岩中包含早期闪长玢岩或花岗闪长斑岩角砾。所

以,整体呈现花岗斑岩→闪长玢岩/花岗闪长斑岩→二长花岗斑岩的演化序列。

杜光树等(1998)最早利用K-Ar法获得甲玛矿区花岗闪长斑岩和花岗斑岩的形成时代,分别为

14.9 Ma 和 13.4 Ma。Chung 等(2003)则进一步利用锆石 SHRIMP U-Pb 测年,获得甲玛矿区 2 件花岗斑岩的侵位时代分别为(17.0±0.5)Ma 和(15.0±0.4)Ma,

同时对透长石和全岩样品进行 Ar-Ar 年代学分析,获得坪年龄分别为(15.2±0.2)Ma 和(13.2±0.2)Ma(图 7)(Chung et al., 2003)。

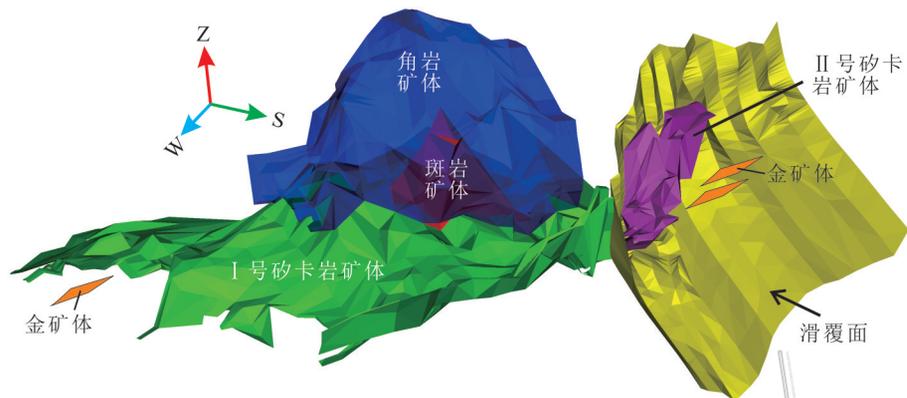


图 4 甲玛矿区“多元”矿体结构模型三维示意图

Fig.4 3D model of multiple orebodies structure in the Jiama deposit

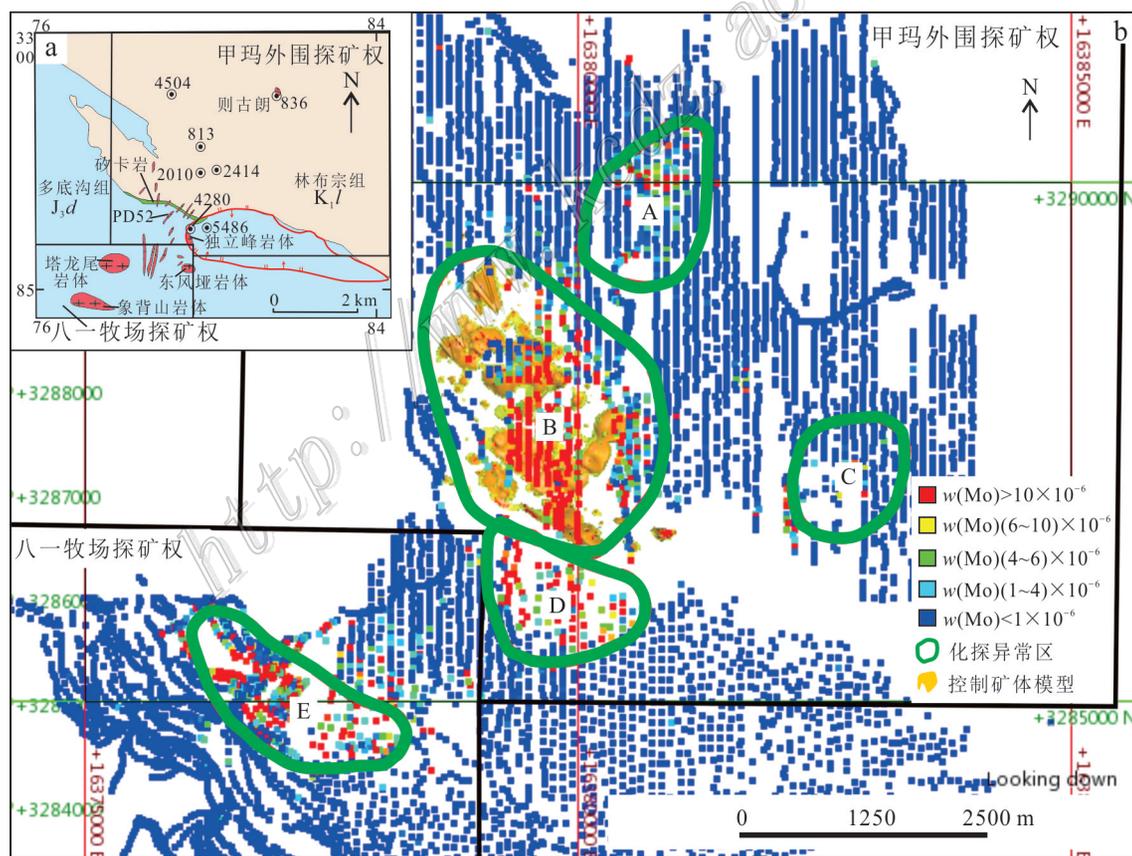


图 5 甲玛矿区及八一牧场矿区地质简图(a,图例同图 1)及化探解译图(b)

A—则古朗北异常区;B—主矿段异常区;C—莫古朗异常区;D—南坑矿段异常区;E—象背山异常区

Fig. 5 Geological map (a) and interpretation map of geochemical data (b) in Jiama and Bayimuchang area

A—Zegulang anomalous area; B—Main ore block anomalous area; C—Mogulang anomalous area;

D—Nankeng ore block anomalous area; E—Xiangbeishan anomalous area

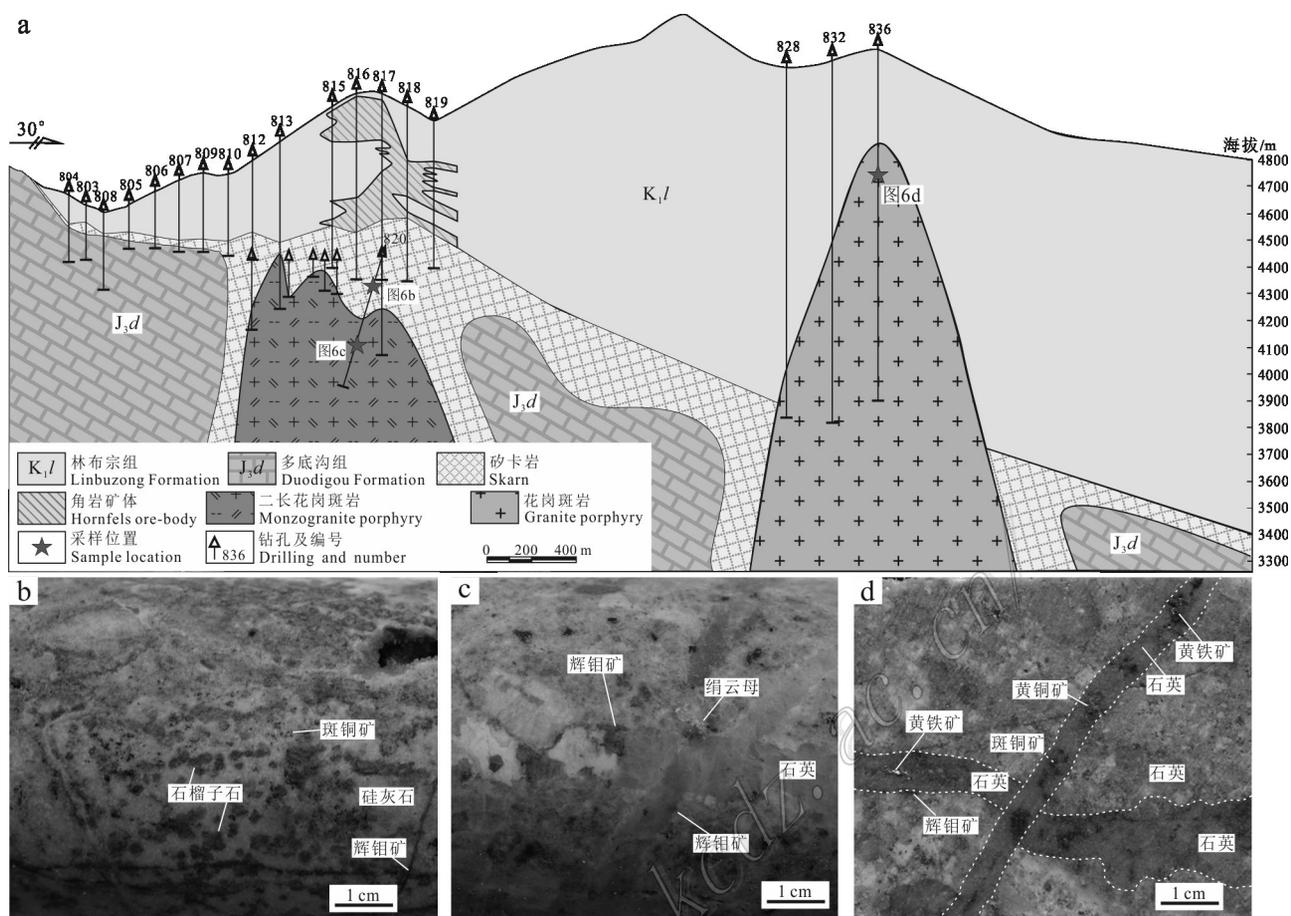


图6 甲玛矿区8号剖面(a)及典型矿化照片(b~d)

b. 石榴子石硅灰石矽卡岩中浸染状富铜矿化; c. 蚀变二长花岗斑岩中多组石英-辉钼矿脉; d. 蚀变花岗斑岩中多组石英-硫化物脉

Fig. 6 No. 8 geological section (a) in the Jiama deposit and typical mineralization photos (b~d)

b. Disseminated Cu-rich mineralization in garnet wollastonite skarn; c. Quartz-molybdenite veins in altered monzonitic granite porphyry;

d. Quartz-sulfide veins in altered granite porphyry

在进一步详细完成矿区外围地质填图后,于象背山、塔龙尾、东风垭、独立峰等多处发现花岗斑岩和二长花岗斑岩岩脉(图5),并利用锆石 LA-ICP-MS 测年,分别获得岩体侵位时代为(16.1±0.2)Ma、(16.0±0.4)Ma、(14.8±0.1)Ma 和(15.2±0.3)Ma (秦志鹏等, 2011)。对于区内含矿斑岩的年代学研究,主要包括2个部分:①是在铅山52号探矿平硐中,对硐口含长石巨斑的花岗斑岩和硐内46.7 m处的含黄铜矿化花岗闪长斑岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 测年(应立娟等, 2011),其中,花岗斑岩岩脉切穿石英钠长斑岩和矽卡岩,形成时限略晚于矽卡岩化时限,获得的年龄值为(14.2±0.2)Ma;而含矿花岗闪长斑岩的结晶时代为(14.1±0.1)Ma;②对钻孔中多处揭露的不同类型的岩脉进行详细的锆石 U-Pb 年代学分析。

其中,花岗闪长斑岩为(15.7±0.1)Ma(813~171.7 m),石英闪长玢岩为(16.0±0.1)Ma(813~339.1 m),二长花岗斑岩为(16.0±0.1)Ma(2010~663.7 m)、(15.6±0.1)Ma(813~605.2 m)和(15.5±0.1)Ma(2414~621.3 m)(应立娟, 2012)。此外,铅山采场露天中,可见早期侵位的闪长玢岩受后期构造影响发生褶皱变形,其形成时代为(16.9±0.4)Ma(Duan et al., 2014)。而牛马塘钻孔中闪长玢岩的形成时代为(14.0±0.1)Ma(4504~188.5 m)(图5)(应立娟, 2012)。对于新探获的南坑矿段和则古朗北矿段,其年代学研究相对较为薄弱。其中,南坑矿段钻孔中,含矿花岗闪长斑岩侵位时代为(14.8±0.2)Ma(5486~126.3 m)和含矿的花岗斑岩侵位时代为(15.4±0.5)Ma(4280~345 m)(唐攀等, 2019;邹兵等, 2019)。则古朗北矿段,地表蚀变花岗

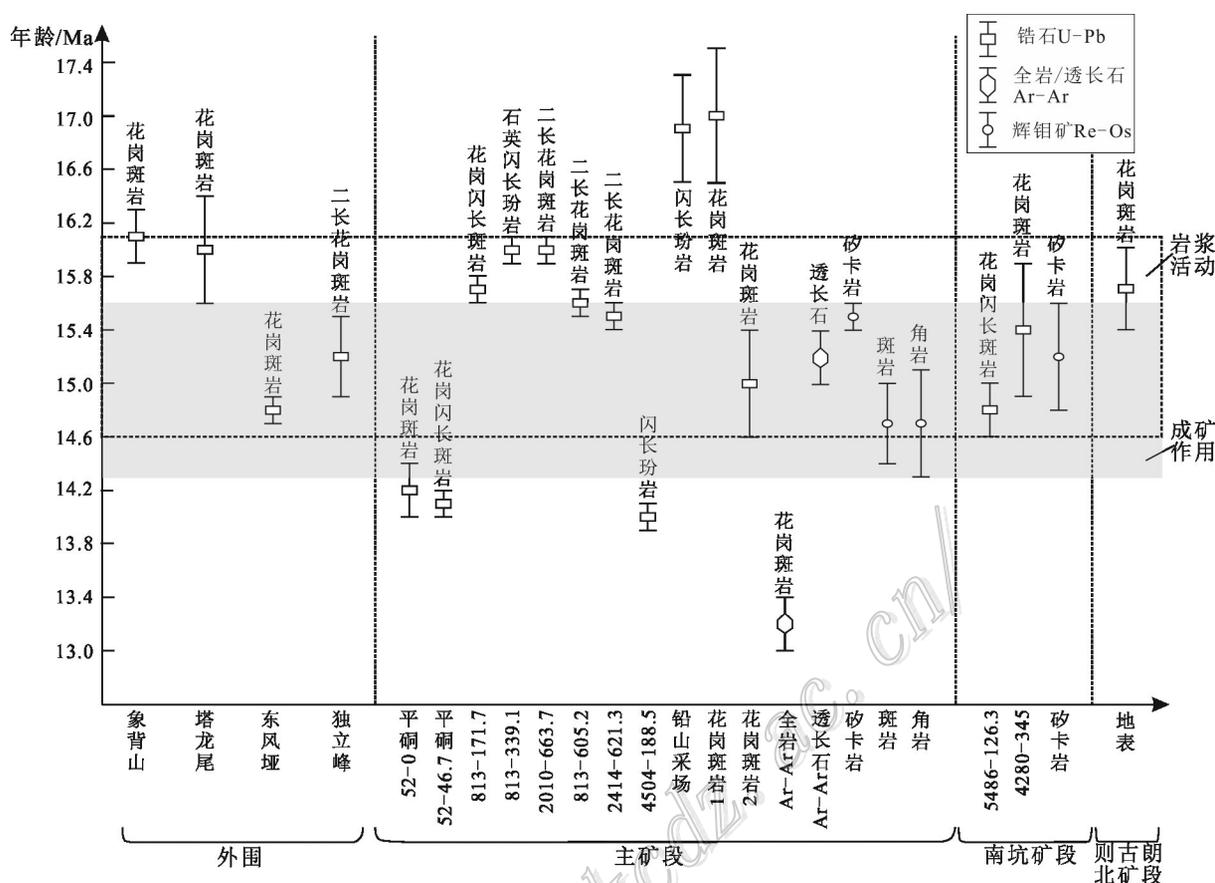


图7 甲玛矿区及外围成岩成矿年代学(数据引自 Chung et al., 2003; Zheng et al., 2016; 秦志鹏等, 2011; 应立娟等, 2009; 2010; 2011)

Fig. 7 Geochronology of magmatism and mineralization in the Jiama deposit and peripheral areas(data after Chung et al., 2003; Zheng et al., 2016; Qin et al., 2011; Ying et al., 2009; 2010; 2011)

斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 (15.7 ± 0.3) Ma。主矿段砂卡岩矿体中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (15.5 ± 0.1) Ma, 斑岩矿体和角岩矿体中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄分别为 (14.7 ± 0.3) Ma 和 (14.7 ± 0.4) Ma (应立娟等, 2010)。南坑矿段中 II 号砂卡岩矿体辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (15.2 ± 0.4) Ma (图 7) (唐攀等, 2019)。

综合分析上述年代学成果,除传统的 K-Ar 法和全岩 Ar-Ar 法年代学结果差异较大(可能为测试方法的系统误差)外,甲玛矿区及外围与成矿作用有关的岩浆活动时限主要集中在 14~17 Ma,属于中新世岩浆活动的产物。其中,花岗斑岩侵位相对较早,结晶时限变化较大,与实际地质情况一致;二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩则侵位相对集中,且与辉钼矿化时限基本一致,与野外现象吻合。而闪长玢岩或石英闪长玢岩,具有多期次侵位的现象。就主矿段而言,无论砂卡岩、斑岩或是角岩型矿体中,辉钼矿的矿化时限在误差范围内

基本一致,说明其为同一成矿事件的产物。此外,南坑矿段的含矿斑岩侵位时限和辉钼矿矿化时限,与主矿段的基本一致,同时,则古朗北矿段含矿花岗斑岩的结晶时代也与主矿段和南坑矿段的基本一致。

从矿区地质概况以及各矿段矿化、蚀变结构和年代学结果来看,甲玛矿区主矿段、南坑矿段、则古朗北矿段和外围的象背山等地区,均具有相同的成矿地质背景,成矿地质条件相似,矿化和蚀变信息相同,且距离较近,受控于同一岩浆活动系统,只是它们在浅部产出的构造空间不同,故而它们属于统一岩浆成矿系统中不同空间位置的产物。

5 多中心复合成矿作用模型及对勘查找矿的启示

经典的斑岩成矿系统模型良好的揭示了同一成

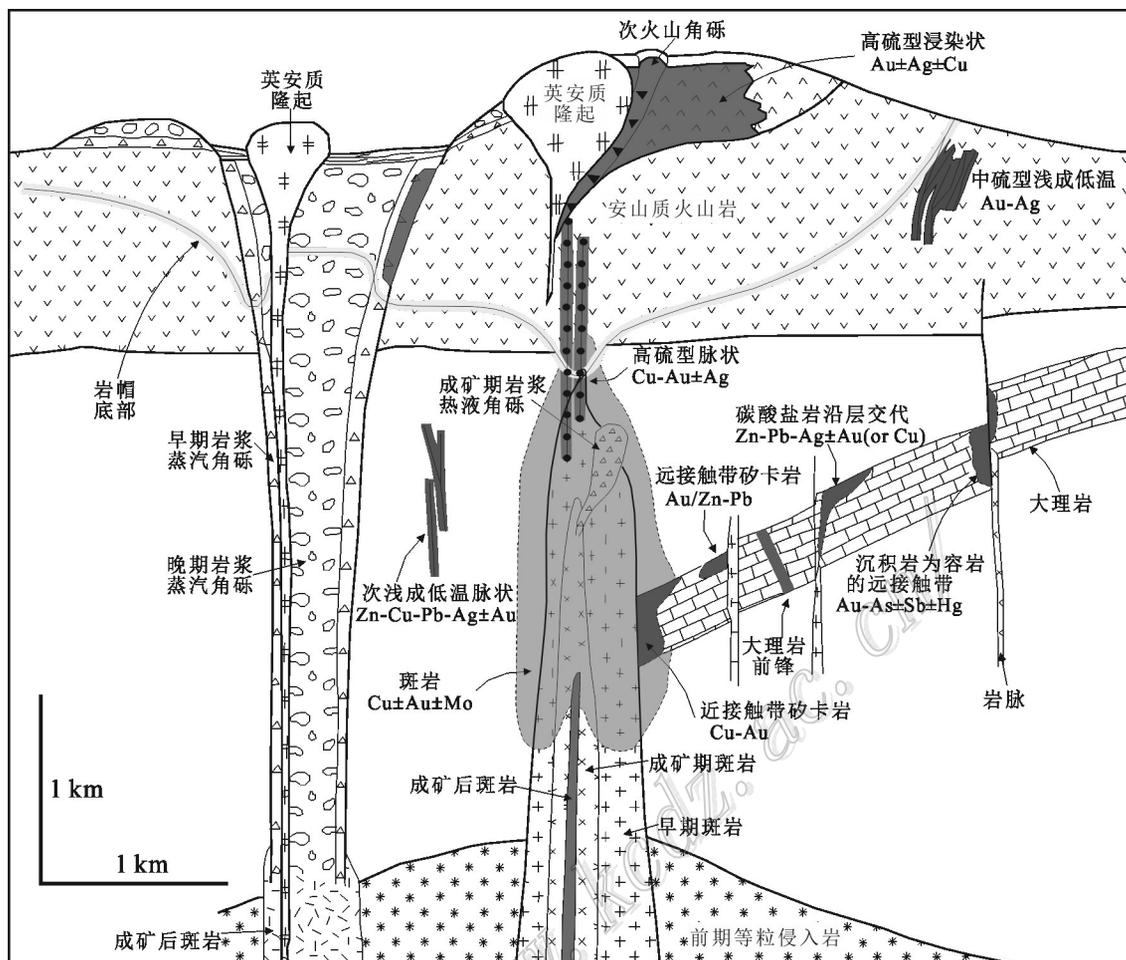


图8 斑岩成矿系统成矿作用模型 (Sillitoe, 2010)

Fig. 8 Mineralization model of the porphyry copper system (after Sillitoe, 2010)

矿系统中,不同类型矿体的空间耦合关系,也反映了矿化和蚀变分带结构模型(图8)(Sillitoe, 2010)。尽管该模型对全球俯冲带(以安第斯成矿带为代表)中斑岩成矿系统的研究与勘查产生了重大的影响(Gatzoubaros et al., 2014; King et al., 2014; Lin et al., 2017),但它与碰撞造山带(以冈底斯成矿带为代表)斑岩成矿系统的地质事实存在诸多出入或不吻合的地方(Zheng et al., 2016),说明其并不能完全套用于碰撞造山环境下的斑岩成矿系统。

为此,本次以甲玛超大型矿床为实例,将其作为冈底斯铜矿带的碰撞后斑岩成矿系统的典型代表,基于甲玛矿区内十余年的勘查和研究成果,创建碰撞造山背景下斑岩成矿系统“多中心复合成矿作用”模型(图9)。

5.1 基本地质要素

(1) 地层: 甲玛矿区下伏地层为中生界上侏罗

统多底沟组,其岩性主要为灰岩、大理岩。上覆地层为中生界下白垩统林布宗组,岩性为灰黑色板岩、粉砂岩,夹灰白色石英砂岩,部分受热液烘烤蚀变为角岩。其中,多底沟组碳酸盐岩,作为围岩,与后期侵位的中酸性岩浆热液发生广泛的接触交代反应,从而形成超大规模的砂卡岩型矿体。为砂卡岩矿体的形成提供了充足的钙质、铝质组分,也为金属矿物的沉淀和矿体的就位提供空间。林布宗组的长英质砂岩、硅化角岩,富含硅质、碳质等还原性组分,孔隙度相对较差,为热液流体沉淀提供了良好的圈闭条件和地球化学障。同时,深部部分含钙质组分的砂岩或角岩,亦可直接与中酸性流体发生接触交代反应,形成石榴子石砂卡岩或砂卡岩化角岩。

(2) 构造: 矿区内主要的控矿构造为推覆构造体系,局部发育滑覆构造。其中,推覆构造由北东向

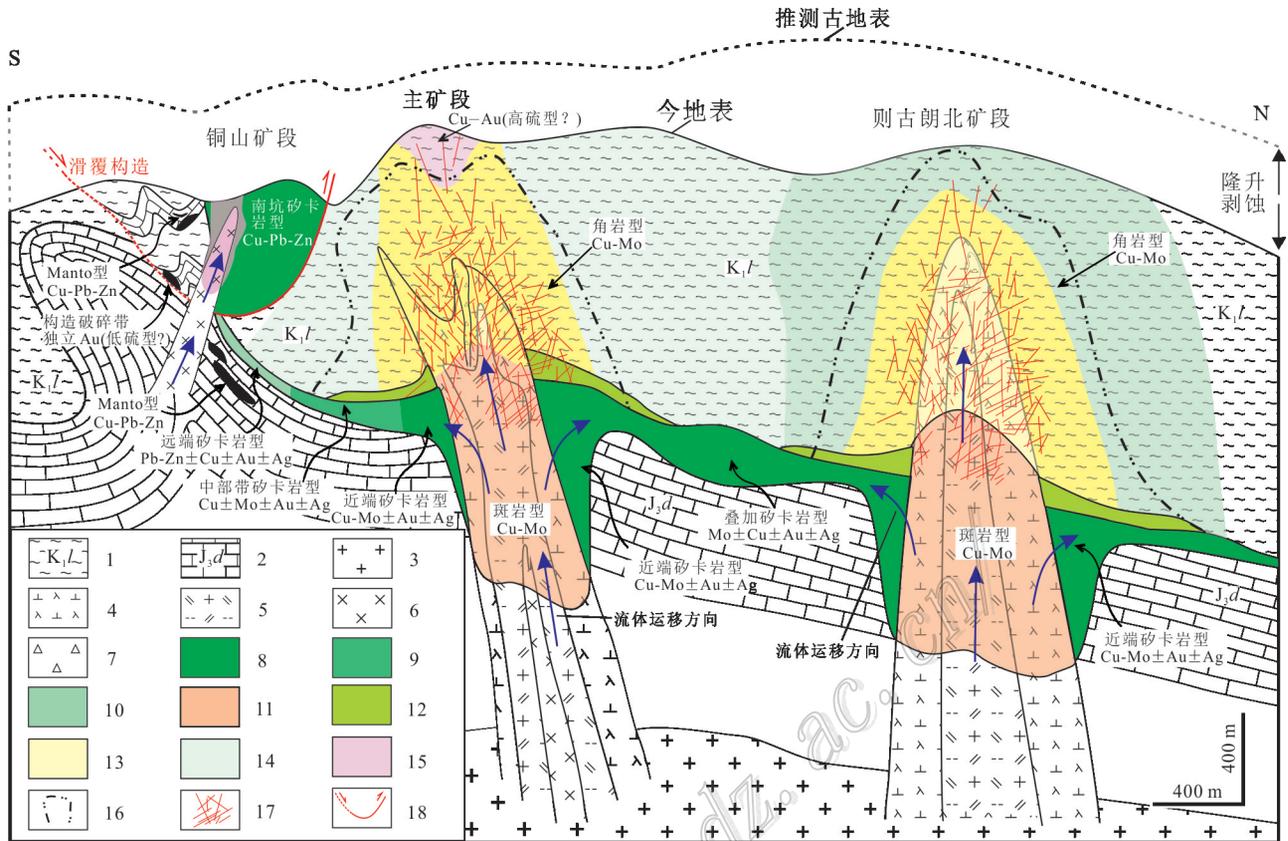


图9 甲玛矿区多中心复合成矿作用模型

1—林布宗组砂、板岩;2—多底沟组灰岩、大理岩;3—浅部岩浆房;4—花岗闪长斑岩;5—二长花岗斑岩;6—花岗斑岩;7—角砾岩;8—近端砂卡岩;9—中部砂卡岩;10—远端砂卡岩;11—钾硅酸盐岩化;12—绿泥石、绿帘石化;13—绢英岩化、弱泥化;14—角岩化;15—强硅化;16—角岩矿体界线;17—裂隙系统;18—滑覆构造

Fig. 9 Polycentric mineralization model of the Jiama deposit

1—Sandstone and slate in Linbusong Formation; 2—Limestone and marble in Duodigou Formation; 3—Upper magma chamber; 4—Granodiorite porphyry; 5—Monzonitic granite porphyry; 6—Granite porphyry; 7—Breccias; 8—Proximal skarn; 9—Intermediate skarn; 10—Distal skarn; 11—Potassic-silicate alteration; 12—Chlorite-epidote alteration; 13—Phyllic and weak argillic alteration; 14—Hornfels alteration; 15—Strong silic alteration; 16—Boundary of hornfels orebody; 17—Fissure system; 18—Slip fault

南西,形成一系列“叠缩式”的逆冲推覆褶皱(钟康惠等, 2012),促使多底沟组与林布宗组发生一定褶皱变形,并形成层间滑脱带,为成矿流体的运移提供良好的通道,也为厚大矿体的赋存提供充足的空间。滑覆构造则作为推覆构造体系的组成部分之一,是推覆褶皱前缘铜山块体逆向滑覆形成的构造。滑覆构造及其所形成的褶皱裂隙,极大的提升了铜山块体的渗透率,为成矿流体的充分运移和沉淀提供了良好空间,促使厚大砂卡岩型富铜铅锌矿体的形成,局部或直接形成 Manto 型纯铜铅锌矿体(唐攀等, 2017)。

(3) 岩浆岩:岩浆岩作为成矿物质和成矿流体的主要来源,甲玛矿区多期次的岩浆活动和流体分

异为成矿作用提供了巨量的金属和流体。花岗斑岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩和二长花岗斑岩等多种岩脉多期次叠加侵位,为成矿物质和流体提供不断的补给,同时,上述岩脉多呈隐伏侵位,出露地表较少,也抑制了成矿流体和成矿物质的溢散。

5.2 主要矿体类型

(1)斑岩型矿体:主要产于深部,与中酸性侵入体密切相关,发育典型的绢英岩化、泥化、弱钾硅酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等蚀变,矿化主要为细脉-浸染状的黄铜矿、黄铁矿和辉钼矿。其中,弱钾硅酸盐蚀变主要位于侵入体深部,绿泥石化、绿帘石化则位于靠近砂卡岩接触带,中-浅部主要为大面积的绢英岩化和弱泥化。斑岩型矿体中发育典型的 A 脉、B

脉和D脉。其中,A脉主要为细粒不规则状的石英细脉、少量钾长石细脉,脉体中矿化相对较弱,见少量的细粒辉钼矿和黄铁矿。脉壁多不规则,延续性差。B脉则主要为石英-辉钼矿脉或石英-黄铁矿-黄铜矿脉,其中,黄铜矿、黄铁矿等硫化物多产于脉体中间,呈中心线状,而辉钼矿则多呈断续线状分布或鳞片状,产于脉体两壁或中间。脉壁平直,连续性较好,脉体两侧蚀变较多,部分可见弱绢英岩化蚀变晕。D脉则多为含孔洞或碳酸盐的黄铁矿脉或黄铁矿-黄铜矿脉,脉体两侧多可见硅化或绢英岩化蚀变晕。脉壁平直,延续性较好。脉体中硬石膏和磁铁矿均不发育,少见含磁铁矿的脉体,深部部分晶洞或裂隙中可见晶形较好的石膏。

(2) 矽卡岩型矿体:主要产于中-深部,产于林布宗组和多底沟组的层间滑脱带,与中酸性侵入体和碳酸盐岩地层紧密相关。矽卡岩矿体中从近端到远端,形成清晰的矿物分带和矿化分带,即有水平分带也有垂向分带。矿化元素由近端到远端,依次为: $\text{Mo}(\text{Cu}\pm\text{Au}\pm\text{Ag})\rightarrow\text{Cu}-\text{Mo}(\pm\text{Au}\pm\text{Ag})\rightarrow\text{Cu}(\text{Mo})\rightarrow\text{Cu}(\text{Pb},\text{Zn})\rightarrow\text{Pb}-\text{Zn}(\text{Au}-\text{Ag})$ 。其中,矽卡岩矿物的水平分带最为明显,从靠近侵入体到远端,依次为内矽卡岩 \rightarrow 透辉石-石榴子石矽卡岩 \rightarrow 石榴子石矽卡岩或石榴子石硅灰石矽卡岩。其中,内矽卡岩是指中酸性侵入体中出现石榴子石等内矽卡岩矿化,主要发育浸染状黄铁矿、黄铜矿;透辉石-石榴子石矽卡岩则发育细粒浸染状的黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿以及黝铜矿、辉铜矿,或少量白钨矿,同时产出大量石膏和方解石等碳酸盐矿物;石榴子石矽卡岩则分布范围最广,从岩体附近向外,石榴子石颜色由棕色逐步过渡为绿色或浅绿色,钙铁与钙铝的比值逐步降低,金属矿物也由辉钼矿、黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿逐步过渡为闪锌矿、方铅矿的矿物组合。靠近碳酸盐岩围岩,常发育大量硅灰石,形成石榴子石硅灰石矽卡岩,其金属矿物主要为斑铜矿、方铅矿、闪锌矿等。垂向分带是指从矿体的顶部到底部,依次为:硅化黑云母角岩 \rightarrow 绿泥石化-绿帘石化角岩 \rightarrow 石榴子石-绿帘石化角岩 \rightarrow 透辉石-石榴子石矽卡岩 \rightarrow 石榴子石矽卡岩 \rightarrow 硅灰石-石榴子石矽卡岩 \rightarrow 石榴子石-硅灰石矽卡岩 \rightarrow 硅灰石矽卡岩 \rightarrow 矽卡岩化大理岩 \rightarrow 大理岩。其中,硅化黑云母角岩主要发育细脉浸染状的黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿;绿泥石化-绿帘石化角岩则多以石英-黄铁矿、石英-辉钼矿为主,少量浸染状黄铜矿;矽卡岩化角岩则发育大量的石英-辉钼矿脉,

呈现富钼的特征;透辉石-石榴子石矽卡岩则多沿石榴子石颗粒间结晶他形的黄铜矿和细粒辉钼矿;石榴子石矽卡岩中发育大量他形黄铜矿,部分被斑铜矿交代,局部发育辉铜矿、黝铜矿以及少量白钨矿;硅灰石-石榴子石矽卡岩主要为他形浸染状的斑铜矿和黄铜矿;硅灰石矽卡岩则以他形斑铜矿为主,见少量黄铜矿;矽卡岩化大理岩则指局部发育的矽卡岩化细脉,靠近脉体两侧发育细粒浸染状的斑铜矿;大理岩中矿化或无明显矿化。

(3) 角岩型矿体:不同于经典的斑岩成矿系统模型,甲玛矿区发育大规模的角岩型矿体。由于矿区浅部地层为长英质砂岩、板岩,在深部岩体侵位过程中,易受热烘烤蚀变为角岩。角岩蚀变过程中发育强烈的硅化,原岩成分全部重结晶,形成杂乱的细粒粒状变晶结构,并发育斑点状或条带状的黑云母化。深部受成矿流体影响,常形成绿泥石化和绿帘石化,靠近矽卡岩矿体可形成含石榴子石的矽卡岩化。矿体主要赋存于强硅化角岩、绿泥石-绿帘石化角岩和矽卡岩化角岩中,与深部隐伏侵位的斑岩体紧密相关,矿化严格受斑岩体侵位形成的裂隙系统控制,即裂隙率越大、脉体越发育,流体运移和沉淀越多,矿化越强。矿化以铜钼矿化为主,伴生低品位金银矿化。其中,铜矿化在浅部较富集,品位相对较高,在深部则相对品位较低。钼矿化则相反,在深部较为富集,浅部较贫。钻孔编录和流体包裹体研究发现,角岩中的铜矿化主要呈微细粒浸染状产于角岩的黑云母条带中,或呈不规则的细脉状产出,且脉体中石英含量相对较少,说明成矿流体中液相组分相对少。而钼则主要在多期次石英-辉钼矿脉产出,辉钼矿呈细粒状、鳞片状产于脉体两侧或中间,亦或是单独呈辉钼矿细脉产出。角岩铜钼矿化分带,可能受金属元素在成矿流体中的迁移方式控制,即铜(金)等元素,主要富集在气相中,以 H_2S 等气相络合物的方式运移,促使其运移距离更远,且不含大量石英脉。而钼元素则主要富集在热液卤水相中,以含Cl离子等液相的形式运移,从而运移距离相对较近,常与石英共生结晶,形成石英-辉钼矿脉(Heinrich et al., 2004; 王艺云等, 2017)。

(4) Manto型矿体:与经典的斑岩成矿系统模型相似,甲玛矿区南坑矿段多处揭示斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、斑铜矿等富硫化物的Manto型矿体(唐攀等, 2017)。这类矿体虽然规模不大,但品位极富,铜平均品位大于1%。矿体受构造控制明显,

通常呈“囊状”或“不规则状”产于矽卡岩化大理岩或大理岩的裂隙或者孔洞中,局部呈现一定的褶皱变形。赋矿围岩中可见弱硅化和碳酸盐化脉石,发育不规则状碳酸盐细脉,即“流体逃逸”现象(邹兵等, 2019)。矿体内部中脉石矿物含量相对较低,主要为少量硅灰石和浅绿色石榴子石。综合认为, Manto型矿体可能是成矿作用晚期富金属低温流体沿裂隙或孔洞充填的产物。

(5) 独立金矿体: 独立的金矿体一直是斑岩成矿系统中最富经济价值的矿体类型。甲玛矿区的独立金矿体可细分为3类(郑文宝等, 2012): 第一类是以石英-黄铁矿-磁黄铁矿脉的形式产于破碎带中, 基本不含铜矿物, 多产于外围或远端的板岩或弱角岩化板岩中, 发育明显的硅化和黄铁矿化; 第二类也是以石英-黄铁矿-黄铜矿脉、石英-黄铁矿-玉髓脉产于大理岩中, 受裂隙或破碎带控制明显, 呈脉状、不规则状产出, 发育硅化和矽卡岩化蚀变; 第三类则以石英-硫化物脉的形式产于闪长玢岩脉中, 硫化物以黄铁矿、毒砂为主, 发育自然金, 蚀变主要为硅化和碳酸盐化(郑文宝等, 2012)。其中, 第一类和第二类矿体规模相对较小, 矿化品位也相对较低, 可能为成矿流体演化晚期, 赋存于破碎带中的远端金矿体。而第三类矿体则规模相对较大, 品位也较高, 如钻孔4504中, 独立金矿体垂直厚度约47.3 m, Au品位为0~27.4 g/t, 平均品位为4.5 g/t。这类矿体与闪长玢岩关系密切, 同时该类闪长玢岩侵位时间明显晚于主成矿期岩浆活动, 说明可能是岩浆演化晚期, 由偏中性富金岩脉的注入形成。

5.3 与传统模型的主要差异

(1) 构造背景不同: 传统的模型建立于俯冲带环境, 即大洋板片向大陆板块俯冲消减或大洋板片向另外一个大洋板片俯冲消减的背景。前者以南美安第斯为代表, 东太平洋板块向南美板块俯冲, 构成陆缘弧环境, 并形成EI Teniente (5 Ma)、Chuquicamata (33.6 Ma)、La Escondida (38 Ma) 等多个世界级斑岩成矿系统(Cooke et al., 2005)。后者以印度尼西亚、菲律宾、巴布利亚新几内亚等火山带为代表, 印度-澳大利亚板块向欧亚板块俯冲, 或欧亚板块向菲律宾板块俯冲等, 构成岛弧环境, 并形成Batu Hijau (3.7 Ma)、Lepanto-Far South East (1.5~1.2 Ma)、Grasberg (3 Ma) 等超大型矿床(Cooke et al., 2005; Hedenquist et al., 2017; Pollard et al., 2005)。而以甲玛矿床为代表的冈底斯成矿带, 则产于碰撞后伸展环境, 即

印度板块向欧亚板块俯冲碰撞后出现东西向伸展, 并发育南北向断裂(Hou et al., 2015), 从而形成甲玛、驱龙、邦铺、厅官等斑岩成矿系统(唐菊兴等, 2012)。所以, 从构造演化来看, 安第斯成矿带和西南太平洋成矿带属于大洋俯冲消减期的产物, 冈底斯成矿带所处的碰撞造山环境是大洋俯冲消减结束后造山作用晚期的产物。

(2) 赋矿围岩不同: 在传统的成矿作用模型, 无论南美安第斯成矿带还是印度尼西亚-菲律宾等西南太平洋成矿带, 其赋矿围岩均以新生代的钙碱性火山岩为主, 如安山岩、英安岩、少量流纹岩, 成矿作用则与高钾碱性-钙碱性的中酸性侵入体有关(Harrison et al., 2018; Seedorff et al., 2005)。而冈底斯成矿带中甲玛、邦铺、驱龙等矿区, 其赋矿围岩则多以中生代的海相沉积地层或火山碎屑岩为主, 并多发育明显的角岩化, 部分矿区存在新生代陆相火山岩(王登红等, 2011)。另外, 冈底斯成矿带广泛分布在林子宗群陆相火山岩, 为俯冲-碰撞期的产物。所以, 甲玛等矿床可能因为成矿过程中, 处于异常的强隆升剥蚀阶段, 其浅部火山岩并未形成或已经被剥蚀殆尽, 其赋矿围岩主要为中生代的岩石。

(3) 矿体类型不同: 与传统的成矿作用模型相比, 造山环境下的甲玛等斑岩成矿系统, 除了保存良好的斑岩型矿体、矽卡岩矿体, 少见保存有高硫化型浅成低温热液矿化和中硫、低硫型浅成低温热液矿体。而这类浅成低温热液型矿体多是酸性低温流体与安山质、英安质等火山岩淋滤、充填的结果, 且空间上赋存位置相对较浅(多小于1 km), 所以在甲玛等矿区, 成矿条件较差, 或已经被剥蚀。甲玛矿区主矿段地表分布的强硅化蚀变, 可能是高硫化成矿作用残留的产物。而南坑矿段以及主矿段牛马塘地区破碎带中独立金矿体, 可能是类似的浅成低温热液型矿体。需要特别强调的是, 在甲玛斑岩成矿系统中, 由于浅部赋矿围岩为中生代的砂、板岩, 并蚀变为硅化角岩, 所以, 在甲玛矿区形成了具有良好经济价值的大型角岩型矿体。

(4) 热源中心不同: 在传统的斑岩成矿作用系统中, 不同类型的成矿作用均主要集中于单一的岩浆热液或侵入体, 并未揭示其与其他侵入体或热源之间的耦合关系。对于甲玛矿床而言, 已有的地质事实揭示, 矿区内及外围存在多个热源中心, 不同热液中心均可以形成多元矿体结构。矿区内主矿段热

液中心集中在钻孔 1616~3216 附近(林彬等, 2012), 而则古朗北矿段热液中心集中于钻孔 836 附近, 而南坑矿段, 其矿化和蚀变分带模型则指示其成矿热液中心可能位于西南缘的花岗斑岩侵入体附近。此外, 矿区外围还存在象背山、莫古朗矿化异常, 推测其深部也具有独立的岩浆热液中心。以主矿段和则古朗北矿段为例, 已有剖面清晰显示, 不同矿段的成矿流体除了独立形成成矿作用以外, 二者可以相互复合叠加, 形成大规模、高品位的叠加型矿体。所以, 就甲玛斑岩成矿系统而言, 存在明显的多中心复合成矿作用模型。

5.4 对勘查找矿的几点启示

对于斑岩成矿系统, 除传统的大比例尺地质、地球物理、地球化学、遥感等勘查手段以外, 目前, 矿产勘查学领域也在不断的创新勘查评价手段, 如利用蚀变矿物的短波红外分析或热红外分析, 确定蚀变分带模型和隐伏岩体侵入中心(Guo et al., 2017); 或利用指针矿物(绿泥石、明矾石、金红石等)矿物学和微量元素地球化学, 确定其与热源中心的距离等(Chang et al., 2011; Wilkinson et al., 2015)。

基于甲玛矿床的多中心复合成矿作用模型以及十余年的勘查实践, 对后续碰撞造山背景下同类矿床勘查评价工作提供一些科学有效的启示:

(1) 坚持大比例尺土壤/岩石地球化学测量与异常解译。在浅覆盖的斑岩成矿系统中, 由于存在大面积的蚀变和矿化作用, 所以, 大比例尺的土壤/岩石地球化学测量能有效揭示其矿化和异常区域。同时, Cu、Mo、Au、Ag、Pb、Zn、Hg、Tl、Se、As、Sb、W、Bi 等多元素异常解译, 也有助于清晰揭示多中心异常位置及相对规模。

(2) 注重大比例尺的构造-蚀变填图。斑岩成矿系统多产于板块聚合边缘, 无论俯冲还是碰撞造山, 均发育强烈的构造变形作用。所以, 开展精细的构造-蚀变填图, 是揭示矿区尺度不同矿体控矿模型的关键, 也是清晰反映不同矿体间耦合关系的重要手段(Duan et al., 2014)。

(3) 强化对斑岩成矿系统认识, 秉承“缺位”找矿理论。在斑岩型矿床的勘查评价工作中, 要坚持其作为完整的成矿系统的理论认识, 即包括: 斑岩型矿体、矽卡岩型矿体、浅成低温热液型矿体、角岩型矿体、隐爆角砾岩型矿体等多种矿体类型。所以, 在实际的勘查工作中, 要注意根据已知矿体, 去开展缺位的未知矿体的找矿工作。如已知斑岩型矿体, 开

展“缺位”的矽卡岩型、浅成低温热液型矿体的勘查工作(唐菊兴等, 2014b)。

(4) 注重角岩化蚀变与成矿。对于斑岩成矿系统而言, 斑岩体顶部的赋矿围岩不同, 所形成的蚀变类型亦不同。若其顶部围岩为粉砂岩、板岩、凝灰岩或变质粉砂岩、片麻岩等, 则不易形成高硫化型蚀变与矿化, 因为这类岩石因渗透率和孔隙度相对差, 对成矿流体能形成良好的圈闭作用, 常受热烘烤形成角岩化蚀变或完全蚀变为角岩。这类岩石通常质地坚硬, 硅化强, 多产于中浅部、易形成大规模的脆性裂隙系统(林彬等, 2012), 从而形成具有良好经济价值的角岩型矿体。目前, 甲玛、雄村、玉龙等多个大型-超大型矿床均存在这类角岩型矿体。

(5) 首次提出斑岩成矿系统多中心复合成矿作用的认识。斑岩成矿系统不仅具有良好的多元矿体结构, 也具有同时空, 点式发散、集中产出的特点。所以, 在开展单热源斑岩矿床的勘查评价工作的同时, 一定要特别注意其附近及外围其余热液中心的勘查, 并利用大比例尺物探、化探测量, 以及构造-蚀变地质填图, 详细厘定多热源中心的存在位置及矿化规模, 从而进一步利用钻探、坑探开展详细的勘探工作。

所以, 基于上述研究认识, 甲玛矿区最新勘查工作部署, 将以则古朗北异常为重点, 以钻孔 836 为中心, 采用大型矿床 200 m×200 m 的详查工程间距, 详细查明或控制该矿段矿体产状和规模, 探获则古朗北矿段的资源潜力。同时利用井下或坑内钻孔, 对主矿体深部的斑岩型矿体和近端厚大矽卡岩型矿体开展持续勘探, 有效促进主矿体深部资源探测。此外, 利用大比例尺的地质填图和剖面测量, 辅以 AMT(音频大地电磁测深), 结合少量钻孔验证, 初步开展甲玛矿区外围象背山异常和莫古朗异常的验证工作, 进一步揭示其他热源中心的成矿作用潜力。

6 结 论

(1) 甲玛是西藏冈底斯成矿带典型的斑岩成矿系统, 具有斑岩型、矽卡岩型、角岩型、Manto 型和独立金矿体多元矿体结构。

(2) 甲玛矿区主矿段、南坑矿段取得重大找矿成果, 则古朗北矿段新发现厚大斑岩型矿体、角岩型矿体和近端矽卡岩型矿体, 具有较大的找矿潜力。此外, 矿区外围的象背山异常和莫古朗异常, 有望取得新的找矿突破。同时, 年代学证据揭示其同属于

中新世岩浆活动的产物。

(3) 详细的矿体地质结构和勘查成果揭示,甲玛矿床不同于传统的斑岩成矿系统模型,而具有多中心复合成矿作用特征,即受控于同一岩浆房的大型斑岩成矿系统,在浅部具有多个热液和矿化中心,存在多种矿化和蚀变作用共存,局部可以叠加,且矿化元素复杂多样,具有巨型的成矿规模及良好的找矿前景。其成矿作用模型对冈底斯成矿带乃至碰撞造山背景下的斑岩成矿系统的勘查和综合研究有重要指导意义。

致谢 感谢西藏华泰龙矿业开发有限公司为笔者提供的野外支持。感谢匿名审稿专家提出的宝贵审改意见。

References

- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Jr Garcia J, Gemmel J B, McKnight S and Cuisson A L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. *Econ. Geol.*, 106: 1365-1398.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zone: Melting of thickened lower crust in southern Tibet[J]. *Geology*, 31: 1021-1024.
- Cooke D R, Hollings P and Walsh J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Econ. Geol.*, 100: 801-818.
- Du G S, Yao P, Pan F C, Su D K, Li W B and Ning Y Y. 1998. Sedimentation-exhalation skarn and its mineralization: An example from the Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet[M]. Chengdu: Sichuan Science Publishing House. 82-113(in Chinese).
- Duan J L, Tang J X, Mason R, Zheng W B and Ying L J. 2014. Zircon U-Pb age and deformation characteristics of the Jiama porphyry copper deposit, Tibet: Implications for relationships between mineralization, structure and alteration[J]. *Resource Geology*, 64: 316-331.
- Gatzoubaros M, Quadt A V, Gallhofer D and Rey R. 2014. Magmatic evolution of pre-ore volcanics and porphyry intrusives associated with the Altar Cu-porphyry prospect, Argentina[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 55: 58-82.
- Guo N, Cudahy T, Tang J X and Tong Q X. 2017. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry-skarn Cu deposit, Central Tibet using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.027>.
- Halley S, Dilles J H and Tosdal R M. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1: 12-17.
- Harrison R L, Maryono A, Norris M S, Rohrlach B D, Cooke D R, Thompson J M, Creaser R A and Thiede D S. 2018. Geochronology of the Tumpangpitu porphyry Au-Cu-Mo and High-sulfidation epithermal Au-Ag-Cu deposit: Evidence for pre- and postmineralization diatremes in the Tujuh Bukit district, southeast Java, Indonesia[J]. *Econ. Geol.*, 113: 163-192.
- Hedenquist J W, Arribas R and Aoki M. 2017. Zonation of sulfate and sulfide minerals and isotopic composition in the Far southeast porphyry and Lepanto epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. *Resources Geology*, 67: 174-196.
- Heinrich C A, Driesner T, Stefansson A and Seward T M. 2004. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits[J]. *Geology*, 32: 761-764.
- Hou Z Q. 2010. Metallogensis of continental collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30-58(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, Zheng Y C, Zhu D C, Yang Z M, Yang Z S, Wang B D, Pei Y R, Zhao Z D and McCuaig T C. 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa Terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Econ. Geol.*, 110: 1541-1575.
- King J, Williams-Jones A E, Hinsberg V V and Williams-Jones G. 2014. High-sulfidation epithermal pyrite-hosted Au (Ag-Cu) ore formation by condensed magmatic vapors on Sangihe Island, Indonesia[J]. *Econ. Geol.*, 109: 1705-1733.
- Leng Q F, Tang J X, Zheng W B, Lin B, Wang Y Y, Tang P and Lin X. 2015. A study of ore-controlling factors of thick and large skarn orebodies in Jiama porphyry metallogenic system, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 34(2): 273-288(in Chinese with English abstract).
- Leng Q F. 2016. Skarn diagenesis and metallogenesis in Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet (doctoral thesis) [D]. Supervisor: Chen Y C. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-188(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Zhang Z, Zheng W B, Leng Q F, Zhong W T and Ying L J. 2015. Preliminary study of fissure system in Jiama porphyry deposit of Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(3): 579-589(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, Song Y, Hall G, Wang Q, Yang C, Fang X, Duan J L and Yang H H. 2017. Geochronology and genesis of the Tiegelongnan porphyry Cu(Au) deposit in Tibet: Evidence from U-Pb, Re-Os dating and Hf, S, and H-O isotopes[J]. *Resources Geology*, 67: 1-21.
- Mao J W, Luo M C, Xie G Q, Liu J and Wu S H. 2014. Basic characteristics and new advances in research and exploration on porphyry copper deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2153-2175(in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, Zhu D C, Wang L Q, Li G M, Zhao Z D, Geng Q R and Li Z L. 2006. Spatial-temporal framework of the

- Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521-533(in Chinese with English abstract).
- Pollard P J, Taylor R G and Peters L. 2005. Ages of intrusion, alteration, and mineralization at the Grasberg Cu-Au deposit, Papua, Indonesia[J]. *Economic Geology*, 100: 1005-1020.
- Qin Z P, Wang X W, Duo J, Tang X Q, Zhou Y and Peng H J. 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon age of intermediate-acidic intrusive rocks in Jiama of Tibet and its metallogenic significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 339-348(in Chinese with English abstract).
- Qin Z P. 2013. Genetic model of the Jiama copper-polymetallic ore deposits, Tibet (doctoral thesis) [D]. Supervisor: Duo J. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-167(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 98: 1515-1533.
- Richards J P. 2014. The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: Implications for metallogeny[J]. *Lithos*, 233: 27-45.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi M T, Zurcher L, Stavast W J A, Johnson D A and Barton M D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[J]. *Econ. Geol.*, 100: 251-298.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Tang J X, Chen Y C, Duo J, Liu H F, Du X, Zhang J S, Zheng W B and Gao Y M. 2009. The main deposit type, metallogeny and exploration in the eastern of Gangdese metallogenic belt, Tibet[C]. *Acta Mineralogica Sinica*. 476-478(in Chinese).
- 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).
- Tang J X, Deng S L, Zheng W B, Ying L J, Wang X W, Zhong K H, Qin Z P, Ding F, Li F J, Tang X Q, Zhong Y F and Peng H J. 2011. An exploration model for Jiama copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 179-196(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Duo J, Liu H F, Lang X H, Zhang J S, Zheng W B and Ying L J. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Zheng W B, Chen Y C, Wang D H, Ying L J and Qin Z P. 2013. Prospecting breakthrough of the deep porphyry ore body and its significance in Jiama copper polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1100-1110(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang L Q, Zheng W B and Zhong K H. 2014a. Ore deposits metallogenic regularity and prospecting in the eastern section of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2545-2555(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang Q, Yang C, Ding S, Lang X H, Liu H F, Huang Y, Zheng W B, Wang L Q, Gao Y M, Feng J, Duan J L, Song Y, Wang Y Y, Lin B, Fang X, Zhang Z and Yang Y Y. 2014b. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: Practice of "absence prospecting" deposit metallogenic series[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1151-1170(in Chinese with English abstract).
- Tang P, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F, Lin B, Tang X Q, Wang H, Gao X, Zhang Z B and Zhou H B. 2017. Is Tongshan orebody in the Jiama copper-polymetallic deposit Manto-type ore[J]? *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5): 829-838(in Chinese with English abstract).
- Tang P, Tang J X, Lin B, Zheng W B, Leng Q F, Gao X, Zhang Z B, Zou B and Yang Y. 2019. The multi-factor constraints on the massive metallogenesis of porphyry ore-forming system—Case studies of Jiama superlarge deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, in press.
- Wang D H, Tang J X, Ying L J, Lin B and Ding S. 2011. Hornfels feature in the Jiama ore deposit, Tibet and its significance on deep prospecting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2103-2108(in Chinese with English abstract).
- Wang L Q, Tang J X, Cheng W B, Chen W, Zhang Z, Lin X, Luo MC and Yang C. 2015. Origin of the ore-forming fluids and metals of the Bangpu porphyry Mo-Cu deposit of Tibet, China: Constraints from He-Ar, H-O, S and Pb isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 276-287.
- Wang R, Weinberg R F, Collins W J, Richards J P and Zhu D C. 2018. Origin of postcollisional magmas and formation of porphyry Cu deposits in southern Tibet[J]. *Earth-Sciences Reviews*, 181: 122-143.
- Wang Y Y, Zheng W B, Chen Y C, Tang J X, Leng Q F, Tang P, Ding S and Zhou Y. 2017. Discussion on the mechanism of separation of copper and molybdenum in Jiama porphyry deposit system, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 495-514(in Chinese with English abstract).
- Wilkinson J J, Chang Z S, Cooke D R, Baker M J, Wilkinson C C, Inglis S, Chen H Y and Bruce Gemmel J. 2015. The chlorite proximity: A new tool for detecting porphyry ore deposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 152: 10-26.
- Xu Z G, Chen Y C, Wang D H, Chen Z H and Li H M etc. 2008. Division of metallogenic belts in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-146(in Chinese).
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, Chang Z S, Li Z Q and Song Y C. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 133-159.
- Yang Z M, Goldfarb R J and Chang Z S. 2016. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by

- subduction of the Indian continental plate[J]. Special Publication Society of Economic Geologist, 19: 279-300.
- 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).
- Ying L J, Tang J X, Wang D H, Zheng W B, Qin Z P and Zhang L. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating of porphyry vein from the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2095-2102(in Chinese with English abstract).
- Ying L J. 2012. The metallogeny of the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet (Doctoral thesis) [D]. Supervisor: Wang D H. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 1-159(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z B, Tang J X, Tang P, Chen G L, Zhang Z K, Gao X and Yang Y. 2019. The origin of the mafic microgranular enclaves from Jiama porphyry Cu polymetallic deposit, Tibet: Implications for magma mixing/mingling and mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 934-952(in Chinese with English abstract).
- Zheng W B, Tang J X, Wang X W, Wang H, Ying L J, Zhong Y F and Zhong W T. 2012. Analysis on gold metallization in Jiama copper polymetallic deposit, Tibet[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(1): 181-196(in Chinese with English abstract).
- Zheng W B, Tang J X, Zhong K H, Ying L J, Leng Q F, Ding S and Lin B. 2016. Geology of the Jiama porphyry copper-polymetallic system, Lhasa Region, China[J]. Ore Geology Reviews, 74: 151-169.
- Zhong K H, Li L, Zhou H W, Bai J G, Li W, Zhong W T, Zhang Y Q, Lin J Q, Zheng F S, Huang X Y, Lu B and Lei B. 2012. Features of Jiama(Gyama)-Kajunguo thrust-gliding nappe tectonic system in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4): 411-423(in Chinese with English abstract).
- Zou B, Lin B, Zheng W B, Song Y, Tang P, Zhang Z B and Gao X. 2019. The characteristics of alteration and mineralization and geochronology of ore-bearing porphyry in south pit of Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 953-967(in Chinese with English abstract).
- 技术出版社. 82-113.
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报, 84(1): 30-58.
- 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 林彬, 王艺云, 唐攀, 林鑫. 2015. 西藏甲玛斑岩成矿系统中厚大矽卡岩矿体控矿因素研究[J]. 矿床地质, 34(2): 273-288.
- 冷秋锋. 2016. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩成岩与成矿作用(博士学位论文)[D]. 导师: 陈毓川. 成都: 成都理工大学. 1-188.
- 林彬, 唐菊兴, 张志, 郑文宝, 冷秋锋, 钟婉婷, 应立娟. 2012. 西藏甲玛斑岩矿床裂隙系统的初步研究及意义[J]. 矿床地质, 31(3): 579-589.
- 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 刘军, 吴胜华. 2014. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. 地质学报, 88(12): 2153-2175.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 秦志鹏, 汪雄武, 多吉, 唐晓倩, 周云, 彭慧娟. 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): 339-348.
- 秦志鹏. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床成因模式(博士学位论文)[D]. 导师: 多吉. 成都: 成都理工大学. 1-167.
- 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 刘鸿飞, 杜欣, 张金树, 郑文宝, 高一鸣. 2009. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价[J]. 矿物学报, 476-478.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫佶, 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及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 应立娟, 汪雄武, 钟康惠, 秦志鹏, 丁枫, 黎枫佶, 唐晓倩, 钟裕峰, 彭慧娟. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 30(2): 179-196.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 郑文宝, 陈毓川, 王登红, 应立娟, 秦志鹏. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1100-1110.
- 唐菊兴, 王立强, 郑文宝, 钟康惠. 2014a. 冈底斯成矿带东段矿床成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报, 88(12): 2545-2555.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014b. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1151-1170.
- 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬, 唐晓倩, 王豪, 高昕, 张泽斌, 周洪兵. 2017. 西藏甲玛铜多金属矿床铜山矿体为manto型矿体[J]. 地球学报, 38(5): 829-838.
- 唐攀, 唐菊兴, 林彬, 郑文宝, 冷秋锋, 高昕, 张泽斌, 邹兵, 杨阳. 2019. 斑岩成矿系统巨量金属成矿作用的多因素制约——以西藏甲玛超大型矿床为例[J]. 岩石学报, 待刊.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 林彬, 丁帅. 2011. 西藏甲玛矿区角岩特征及其对深部找矿的意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2103-2108.

附中文参考文献

杜光树 姚鹏 潘凤雏 粟登彦 李文彬 宁英毅. 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

- 王艺云, 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 冷秋锋, 唐攀, 丁帅, 周云. 2017. 西藏甲玛斑岩成矿系统铜钼元素分离机制探讨[J]. 岩石学报, 33(2): 495-514.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民等. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社. 1-146.
- 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矽卡岩中辉钼矿铼-钨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.
- 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 郑文宝, 秦志鹏, 张丽. 2011. 西藏甲玛超大型铜矿区斑岩脉成岩时代及其与成矿的关系[J]. 岩石学报, 27(7): 2095-2102.
- 应立娟. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿机制(博士学位论文)[D]. 导师: 王登红. 北京: 中国地质科学院. 1-159.
- 张泽斌, 唐菊兴, 唐攀, 陈国良, 张忠坤, 高昕, 杨阳. 2019. 西藏甲玛铜多金属矿床暗色包体岩石成因: 对岩浆混合和成矿的启示[J]. 岩石学报, 35(3): 934-952.
- 郑文宝, 唐菊兴, 汪雄武, 王焕, 应立娟, 钟裕锋, 钟婉婷. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床金矿地质特征及成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(1): 181-196.
- 钟康惠, 李磊, 周慧文, 白景国, 李伟, 钟婉婷, 张勇强, 蔺吉庆, 郑凡石, 黄小雨, 陆彪, 雷波. 2012. 西藏甲玛-卡军果推-滑覆构造系特征[J]. 地球学报, 33(4): 411-423.
- 邹兵, 林彬, 郑文宝, 宋扬, 唐攀, 张泽斌, 高昕. 2019. 西藏甲玛矿床南坑矿段蚀变、矿化及含矿斑岩年代学[J]. 岩石学报, 35(3): 953-967.

<http://www.kcdz.ac.cn/>