

doi: 10.12029/gc20210612

张忠坤, 林彬, 陈国良, 邹兵, 杨征坤, 唐攀, 高昕, 祁婧, 李发桥, 高福太, 焦海军, 孙建军, 李亚军, 苏伟. 2021. 西藏甲玛超大型矿床南坑厚大矽卡岩矿体的成岩-成矿-构造耦合关系[J]. 中国地质, 48(6): 1804-1817.

Zhang Zhongkun, Lin Bin, Chen Guoliang, Zou Bing, Yang Zhengkun, Tang Pan, Gao Xin, Qi Jing, Li Faqiao, Gao Futai, Jiao Haijun, Sun Jianjun, Li Yajun, Su Wei. 2021. The diagenesis-mineralization-structure coupling relationship of South-Pit skarn thick ore body in the Jiama super large-sized deposit, Tibet [J]. Geology in China, 48(6): 1804-1817(in Chinese with English abstract).

西藏甲玛超大型矿床南坑厚大矽卡岩矿体的成岩-成矿-构造耦合关系

张忠坤¹, 林彬^{2,3}, 陈国良¹, 邹兵³, 杨征坤¹, 唐攀⁴, 高昕⁵, 祁婧⁶, 李发桥⁶,
高福太¹, 焦海军¹, 孙建军¹, 李亚军¹, 苏伟¹

(1. 西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850212; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 加拿大拉瓦尔大学地质与地质工程系, 加拿大 魁北克 G1V0A6; 4. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 5. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 6. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 甲玛是西藏冈底斯成矿带规模大、品位富的超大型矿床,也是勘查和研究程度最高的矿床之一。其中,南坑矿段由于富含高品位的矽卡岩型铜铅锌矿石,且具大型规模,已被纳入矿区首采矿段之一,然而关于其控岩控矿机制以及其与主矿段的耦合关系却仍不明确。本次基于详细的钻孔编录和野外地质证据,判定其成矿作用与中新世的花岗闪长斑岩等中酸性斑岩体有关,结合高精度的U-Pb年代学分析,厘定含矿花岗闪长斑岩结晶年龄为(15.5±0.3)Ma,与辉钼矿成矿年龄(15.23±0.22)Ma一致。南坑矿段作为甲玛矿床多中心复合成矿作用模型的重要组成部分,其矽卡岩矿体主要产于林布宗组角岩与多底沟组大理岩之间的层间接触带,属于中新世岩浆热液活动的产物。矿体形成后,受滑覆构造及次级断裂影响,矿体发生错断或破坏。对于南坑矿段后续的勘查评价,应注意与含矿斑岩和矽卡岩的蚀变与矿化分带特征,定位致矿热液中心。

关键词: 成岩时代; 构造; 南坑矿段; 矿产勘查工程; 甲玛; 西藏

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1804-14

The diagenesis-mineralization-structure coupling relationship of South-Pit skarn thick ore body in the Jiama super large-sized deposit, Tibet

ZHANG Zhongkun¹, LIN Bin^{2,3}, CHEN Guoliang¹, ZOU Bing³, YANG Zhengkun¹, TANG Pan⁴, GAO Xin⁵, QI Jing⁶, LI Faqiao⁶, GAO Futai¹, JIAO Haijun¹, SUN Jianjun¹, LI Yajun¹, SU Wei¹

收稿日期: 2020-05-24; 改回日期: 2021-11-21

基金项目: 国家重点研发计划-深地专项(2018YFC0604101)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费项目(KK2116, KJ2102)、西藏自治区科技计划项目(XZ201901-GB-24)、国家自然科学基金项目(41902097)、国家留学基金委项目和中国地质调查局项目(DD20190167)联合资助。

作者简介: 张忠坤,男,1967年生,高级工程师,主要从事固体矿产勘查和开发;E-mail: zzk19671004@163.com。

通讯作者: 林彬,男,1987年生,副研究员,硕士生导师,主要从事青藏高原矿产勘查和综合研究;E-mail: linbincags@126.com。

(1. *Tibet Huatailong Mining Corp. Ltd., Lhasa 850212, Tibet, China*; 2. *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China*; 3. *Department of Geology and Geological Engineering, University Laval, QC G1V0A6, Canada*; 4. *Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China*; 5. *Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China*; 6. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The Jiama deposit is one of super large-sized deposits with high grade and one of the most explored and studied deposits in the Gangdese metallogenic belt of Tibet. Because the South-Pit segment host large-sized skarn Cu-Pb-Zn ore bodies with high-grade, it has been given priority to mining. However, its diagenesis, mineralization and the relationship with main segment are still unclear. Based on detailed borehole logging and field geological evidences, it is determined that the mineralization is related to intermediate-felsic porphyries. The high-precision U-Pb dating of ore-bearing granodiorite porphyry yields the age of 15.5 ± 0.3 Ma, which is consistent with the Re-Os age of molybdenite (15.23 ± 0.22 Ma). As the important part of Jiama polycentric complex mineralization model, the skarn ore body in South-Pit segment is mainly distributed on the contact between marble and hornfels. The skarn should be the result of Miocene magmatism and destroyed by the slide nappe fault and secondary faults. For the future exploration in South-Pit, more attention should be paid to the study of alteration and mineralization of ore-bearing porphyry and skarn, and to the locating of the ore-related fluid center.

Key words: Diagenetic age; structure; South-Pit ore segment; mineral exploration engineering; Jiama; Tibet

About the first author: ZHANG Zhongkun, male, born in 1967, senior engineer, engaged in mineral exploration and mining, Email: zzk19671004@163.com.

About the corresponding author: LIN Bin, male, born in 1987, associate researcher, master supervisor, engaged in the research of mineral exploration and metallogeny of Tibet Plateau; E-mail: linbincags@126.com.

Fund support: Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFC0604101), the Basic Research Fund of Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences (No. KK2116, KJ2102); the Science and Technology Plan Project of Tibet Autonomous Region (No. XZ201901-GB-24); the National Natural Science Foundation of China (No. 41902097), the project of China Geological Survey (No. DD20190167).

1 引言

斑岩成矿系统一直是国内外矿床勘查和科学研究的热点。它通常具有规模大、蚀变强、脉体发育、矿化均匀等特征 (Cooke et al., 2005; Sillitoe, 2010; 刘军等, 2019)。在成矿作用方面, 它通常与中酸性侵入体有关, 根据围岩类型的不同, 可以形成多种类型矿体, 包括斑岩型钼铜矿体、隐爆角砾岩、矽卡岩型、浅成低温热液型 (林彬等, 2018, 2019), 构成一个完整的成矿作用系统 (Sillitoe, 2010; 毛景文等, 2014; Lin et al., 2017a, 2017b, 2019)。

甲玛作为青藏高原近年来新发现的超大型矿床 (Yang et al., 2019), 其富含铜、钼、铅、锌、金、银等多种矿化元素, 同时, 在矿体类型上也复杂多样, 包括斑岩钼铜矿体、角岩型铜钼矿体、矽卡岩型铜多金属矿体以及构造破碎带中独立金矿体 (唐菊兴等, 2010, 2011; 郑文宝等, 2010, 2011)。根据勘查程

度和矿权设置等因素, 目前, 甲玛矿区可细分为主矿段、南坑矿段、则古朗北矿段, 共同构成了一个完整的斑岩成矿系统 (林彬等, 2019)。根据十余年的勘查和研究工作, 前人已经对甲玛矿区主矿段的基础地质特征、控岩控矿构造、成岩成矿时代、成矿流体演化等多个方面 (冷秋锋等, 2015a), 进行了详细的研究, 初步构建了甲玛多元矿体结构和多中心复合成矿作用模型, 并系统总结了其勘查评价模型 (应立娟等, 2010, 2011; 王登红等, 2011; 周云等, 2011; 林彬等, 2012, 2019; Duan et al., 2014; Ying et al., 2014; 姚晓峰等, 2014; 王艺云等, 2017)。其中, 南坑矿段因其矿体规模大、品位富、赋存浅、易采选等特征, 资源量约占甲玛总资源量的 1/10, 已被设计为矿区重要的露天首采矿段 (唐攀等, 2017)。尽管前人曾对其矿体基本特征和矿石类型等方面进行了基本的描述和总结, 认为南坑矿体主要赋存于推滑覆构造系统的滑覆带中 (钟康惠等, 2012; 邹兵等,

2019),但对其成矿热液的来源、成岩成矿作用时代以及成矿作用与构造活动的耦合关系,仍不十分明确,制约了南坑矿段后续勘查工作的部署以及对甲玛超大型斑岩成矿系统结构的恢复。为此,本文通过对甲玛矿区南坑矿段详细地质调查和典型剖面的钻孔科学编录,揭示其成矿作用与岩浆的成因联系。同时,利用锆石U-Pb年代学,精确限定成岩作

用时代,并根据主要构造活动痕迹,判定构造活动与成矿作用的耦合关系,为矿段后续的勘查评价提供参考建议。

2 矿区地质概况

甲玛矿区位于青藏高原中南部冈底斯成矿带东段(唐菊兴等,2012,2014a,2016b;Hou et al.,

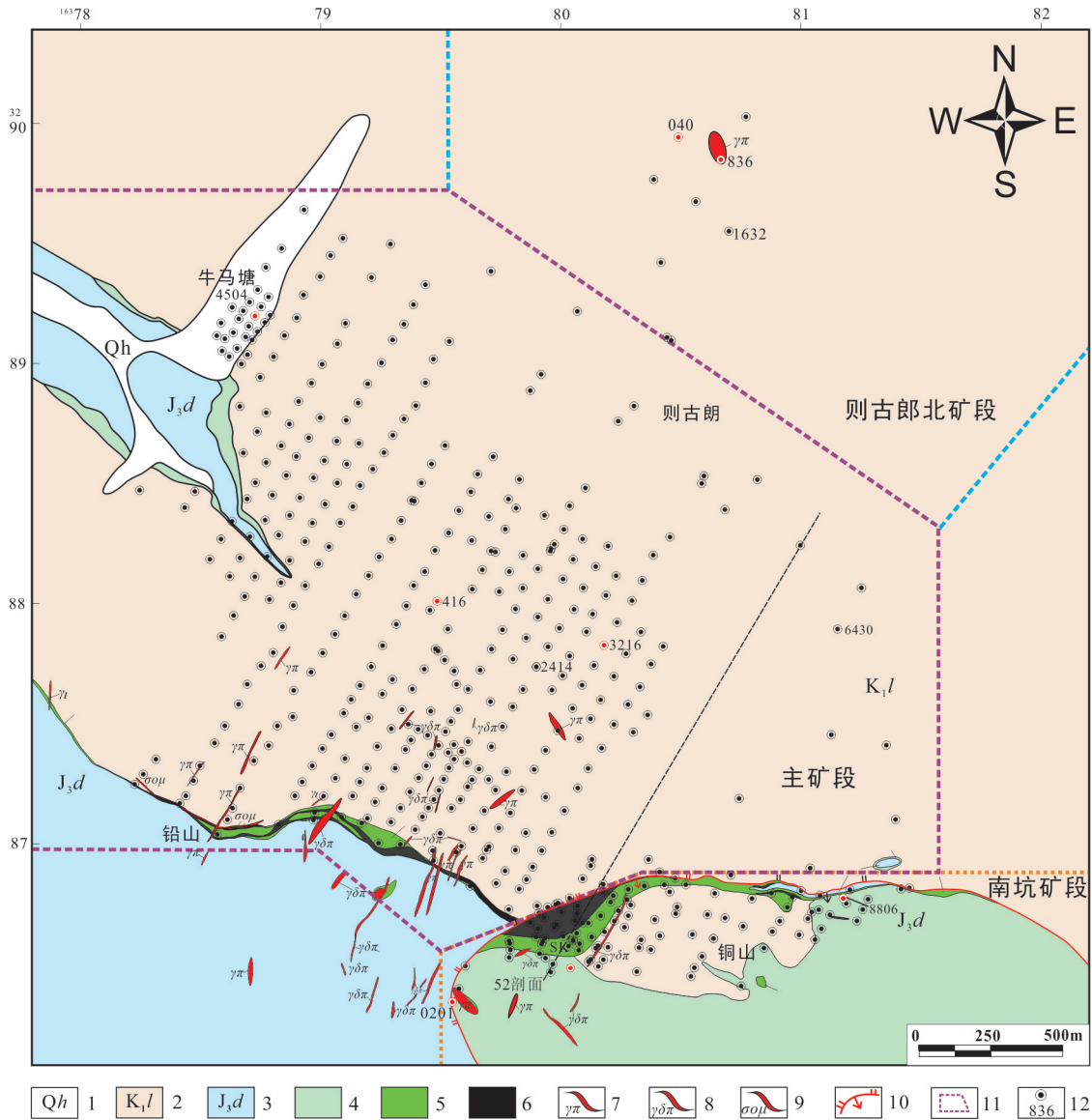


图1 甲玛矿区地质简图(据林彬等,2019)

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—滑覆构造断裂;11—矿段范围;12—钻孔及编号

Fig.1 Geological map of the Jiama deposit (after Lin Bin et al., 2019)

1—Quaternary sedimentary rocks; 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 ore-body; 7—Granite porphyry dikes; 8—Granodiorite porphyry dikes; 9—Quartz-diorite porphyry dikes; 10—Slip fault; 11—Segment of mining; 12—Drilling and number

2015;冷秋锋等,2015b;Yang et al., 2016)。矿区出露地层较为简单,主要为中生代海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积岩,包括上侏罗统多底沟组和下白垩统林布宗组(Zheng et al., 2016)。其中,下伏的多底沟组主要为灰白色—灰色块状结晶灰岩,夹少量薄层灰岩、泥灰岩,常蚀变为大理岩,厚度变化于196~1741 m。上覆的下白垩统林布宗组主要为灰黑色板岩、粉砂岩夹灰白色石英砂岩,常受热蚀变为角岩,厚度变化于112~1495 m(图1)。

矿区主体构造为甲玛—卡军果推覆构造体系和铜山滑覆构造。其中,甲玛—卡军果推覆构造主要指矿区由北向南形成一系列逆冲推覆褶皱构造,明显控制了矿区 I 号矽卡岩主矿体的空间产出形态。铜山滑覆构造则主要控制推覆构造的前段的滑覆块体,主要控制着南坑矿段的 II 号矿体空间产出形态(Zheng et al., 2016)。

甲玛矿区岩浆岩较发育,但地表出露面积较小。主要以中酸性岩脉为主,二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、花岗斑岩、花岗细晶岩以及少量的煌斑岩脉(张泽斌等,2019)。其中,二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩多呈细小岩脉产于矿区铅山、铜山一带,而花岗斑岩则多呈岩

枝产于象背山、独立峰、塔龙尾等地(秦志鹏等,2011)。煌斑岩脉则零星产于矿区中部及外围,地表未见出露。

甲玛矿床前期勘查和研究的矿体主要产于矿区主矿段,包括产于矽卡岩中的铜多金属矿体(即 I 号矽卡岩矿体)、产于角岩中的铜钼矿体、产于斑岩中的钼(铜)矿体以及产于构造破碎带中的独立金矿体(Duan et al., 2014; Zheng et al., 2016; Guo et al., 2017),简要的矿体地质特征见表 1。

3 南坑矿段地质特征

南坑矿段位于甲玛矿区的东南部,其基础矿床地质特征与主矿段相似,出露地层也主要为林布宗组的砂岩、板岩和角岩以及多底沟组的灰岩、大理岩(图1)。

早期构造解译揭示,南坑矿段矽卡岩矿体明显受铜山滑覆体控制。滑覆构造的形成,主要是由于甲玛推覆构造运动形成的高位岩块在重力的作用下失去了稳定性反向滑覆,导致了矿段内林布宗组地层及多底沟组地层相互错杂分布的独特构造现象。矿段内矽卡岩富矿体受滑覆构造体内次级褶皱和断裂控制(图2a)。

表 1 甲玛斑岩成矿系统不同类型矿体地质特征

Table 1 Geology of different types of ore bodies in the Jiama porphyry system

矿体类型	矿体产出位置	矿体产状及规模	矿物组合	成岩成矿时限
矽卡岩铜多金属矿体	矿体主要呈似层状、厚板状产于林布宗组砂板岩、角岩与多底沟组灰岩、大理岩的层间扩容带内	矿体赋存于 5000~4100 m 海拔标高,总体走向为北西-南东,长约 3000 m,倾向北东,延伸超过 2600 m	金属矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、辉铜矿、黄铁矿为主,非金属矿物主要为石榴子石、透辉石、硅灰石、石英、方解石、石膏等	石榴子石 U-Pb 年龄 15.2 Ma(未刊数据);辉钼矿 Re-Os 年龄 15.37 Ma (Zheng et al., 2016)
角岩型铜钼矿体	矿体主要呈筒状产于林布宗组的砂岩、角岩中。矿体空间上位于深部隐伏斑岩与巨厚矽卡岩矿体之上	主要产于矿区 0~44 线,赋存于 5200~4300 m 海拔标高之间。矿体走向北西-南东,长约 1300 m,倾向近直立,延伸超过 900 m	金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、赤铁矿等,非金属矿物主要为石英、黑云母、绢云母、绿泥石、绿帘石	辉钼矿 Re-Os 年龄 14.67 Ma (Zheng et al., 2016)
斑岩型钼铜矿体	矿体主要呈筒状、厚板状产于深部的斑岩体中,与矽卡岩矿体和角岩型矿体紧密接触	主要产于矿区 0~40 线深部。矿体走向北东-南东,长约 600 m,近直立延伸超过 600 m	金属矿物主要为黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿,非金属矿物主要为石英、斜长石、黑云母、绢云母以及少量绿泥石、绿帘石	含矿斑岩锆石 U-Pb 年龄 15.5~16.0 Ma (Zheng et al., 2016); 辉钼矿 Re-Os 年龄 14.66 Ma (Zheng et al., 2016)
破碎带金矿体	产于林布宗组板岩、角岩破碎带或裂隙中;或产于大理岩或石英闪长玢岩中	主要产于矿区外围的 45~47 线,0 线,88 线等,矿体主要为透镜状	金属矿物主要为斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿;非金属矿物主要为石英、方解石等	尚无年代学证据;根据其 与闪长玢岩脉的关系,推测与主矿段成矿时限一致

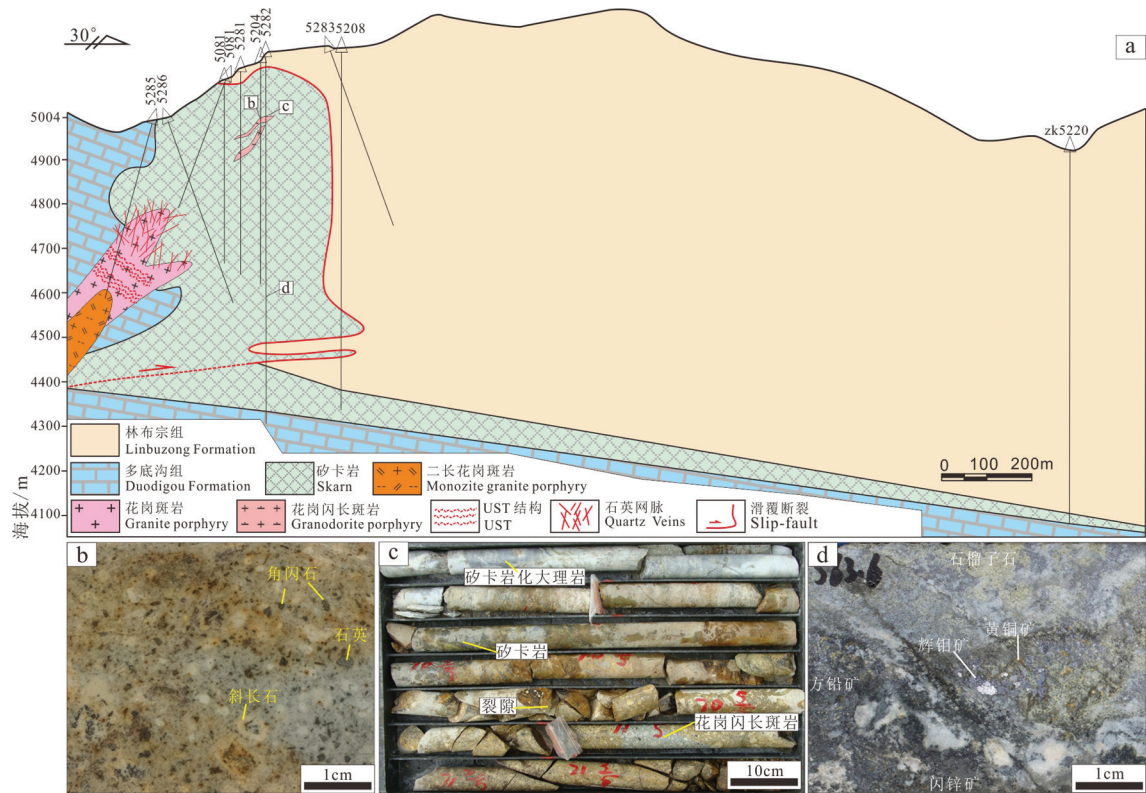


图2 甲玛矿区南坑矿段52号剖面(a)及典型矿化照片(b~d)

b—花岗闪长斑岩;c—花岗闪长斑岩与矽卡岩化大理岩接触带;d—矿化石榴子石矽卡岩

Fig.2 No. 52 section (a) and typical mineralization photos (b~d) in South Pit segment of the Jiama deposit
b—Granodiorite porphyry; c—Contact between granodiorite porphyry and skarn marble; d—Mineralized garnet skarn

南坑矿段内,岩浆岩发育较弱,主要以少量细小岩脉产出,包括花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩和少量花岗细晶岩,其中,花岗闪长斑岩是主要的含矿斑岩之一(图2b)。

南坑矿段主要矿体地质特征与主矿段却略有差异。矿体厚大、富含高品位的铜铅锌矿化,是南坑矿段矿体最突出的特征。根据最新勘查成果揭示,南坑矿段的II号矿体主要为矽卡岩型铜铅锌矿体,矿体主要呈厚板状或块状,产于林布宗组角岩与多底沟组大理岩的层间接触带中(图2a、c)。矿段主要产于40~92线,由一个巨厚的主矿体和少量透镜状矿体组成,赋存海拔标高一般处于5100~4300 m,矿体走向近EW向,倾角较陡,主矿体厚度多超过100 m。

详细的钻孔编录揭示,南坑矿段矽卡岩型铜铅锌矿体中金属矿物主要为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿、黄铁矿、辉钼矿,局部发育少量的孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿。非金属矿物主要为石榴子石、透

辉石、硅灰石、石英、方解石等。矿石类型主要为中等浸染状、团斑状、块状矿石,金属硫化物含量较高(图2d)。

矿段内蚀变主要为大规模的角岩化、矽卡岩化以及局部的绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。其中,角岩化主要指受深部隐伏岩体侵位的影响,林布宗组砂岩、板岩受热液流体烘烤发生细粒状重结晶,形成灰黑色的黑云母长石石英角岩,质地坚硬,局部发育弱绿泥石化和绿帘石化。矽卡岩化,则主要指中酸性岩浆热液流体沿林布宗组与多底沟组的地层间接触带运移过程中,与大理岩或砂岩、板岩发生强烈接触交代反应,同时成分交换,形成不同的矽卡岩矿物,最终形成不同类型的矽卡岩。

4 样品采集及测试方法

为精确限定南坑矿区成岩作用时代和构造活动的耦合关系,本次选择南坑矿段,ZK5204-155.2的花岗闪长斑岩进行年代学分析。手标本显示,花

岗闪长斑岩,呈灰白色,有明显的斑状结构,块状构造。斑晶成分主要为石英(20%~25%)、斜长石(15%~25%)、角闪石(5%~10%)、少量钾长石和黑云母(图2)。其中,石英常呈浑圆状,外侧多围绕一圈黄铁矿和绿泥石。斜长石斑晶多发育白云母化蚀变。角闪石和黑云母则多蚀变为绿泥石或绿帘石。基质主要为闪长质。岩体中含少量绿帘石-黄铁矿细脉。

样品碎样后,在双目镜下挑选锆石颗粒(200粒),并利用树脂黏贴制靶。完成制靶后,对锆石进行阴极发光分析(CL)和透反射照相。锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学分析,在中国地质大学(北京)LA-ICP-MS实验室完成。激光剥蚀系统为美国Coherent公司的GeoLasPro 193准分子固体进样系统。ICP-MS为美国Thermo Fisher公司的X Series 2型四极杆等离子体质谱。测试过程中,激光束斑直径为32 μm ,频率为6 Hz。采样氦气作为载气,氩气作为补偿气。采用美国国家标准参考物质NIST SRM610对仪器进行微量元素含量测定的外标。采用标准锆石91500 (Wiedenbeck et al., 1995)作为定年外标,采用标准锆石Mud Tank作为监控样品。样品测试过程中,每测定5个样品点测定两次标准锆石91500,测试完成后,采用软件ICPMSDataCal 11进行样品数据处理,详细的仪器操作条件和数据处理方法同Liu et al.(2008, 2010)。

5 测试结果

阴极发光及透反射照相显示,锆石颗粒呈长柱状,晶形较好,具有清晰的振荡环带,长宽比例多介于1.1~3.0(图3)。U-Pb年代学分析结果显示,锆石颗粒的Th/U比值均大于0.4,结合锆石晶体形态,判定其为岩浆锆石(Belousova et al., 2002)。本次共计获得20个有效锆石测年结果,其中,Th含量介于 480.2×10^{-6} ~ 4946.8×10^{-6} ,U含量介于 487.7×10^{-6} ~ 2672.1×10^{-6} , $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄介于14.7~17.8 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于14.3~16.8 Ma(表2)。利用ISOPLOT软件进行谐和图和平均值年龄绘制,20个有效测年数据均位于谐和线上及其附近,样品点也相对集中,最终获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 $(15.5 \pm 0.3)\text{Ma}$ ($n=20$,MSWD=1.8)(图3)。

6 讨论

6.1 南坑矿段成岩成矿时代

成岩成矿时代是揭示矿体成因的关键因素。前人曾对南坑矿段开展过详细的构造地质填图,发现其明显受控于滑覆断裂(钟康惠等,2012)。同时,其矿石类型主要为矽卡岩型矿石,属于岩浆热液与多底沟组大理岩接触交代形成的产物,也判定其成矿作用与中新世的岩浆活动有关(邹兵等,2019)。此次通过对南坑矿段重要的含矿斑岩-花

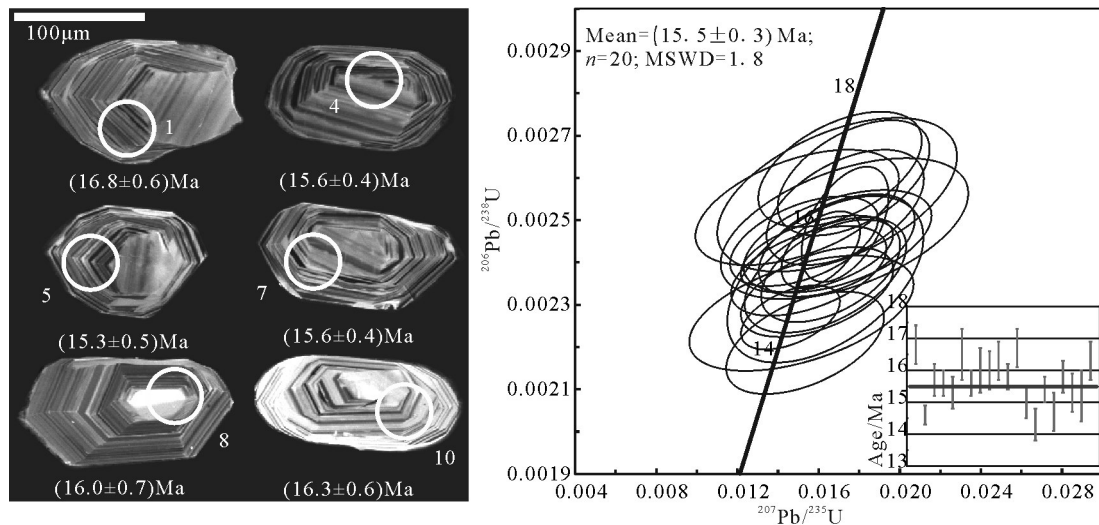


图3 南坑花岗闪长斑岩典型锆石阴极发光图像和U-Pb年龄

Fig.3 Cathode luminescence (CL) and U-Pb age of granodiorite porphyry in South Pit

表2 甲玛南坑矿段花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄

Table 2 U-Pb age of zircon from granodiorite porphyry in South -Pit, Jiama deposit

测点	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
JM5204-155.2-1	562.7	1176.9	0.5	0.05286	0.00869	0.01706	0.00266	0.00262	0.00009	324.1	333.3	17.2	2.7	16.8	0.6
JM5204-155.2-2	1096.8	1519.6	0.7	0.04970	0.00581	0.01462	0.00161	0.00227	0.00005	189.0	242.6	14.7	1.6	14.6	0.3
JM5204-155.2-3	737.2	1327.8	0.6	0.05512	0.00815	0.01690	0.00254	0.00244	0.00008	416.7	330.5	17.0	2.5	15.7	0.5
JM5204-155.2-4	610.2	1147.1	0.5	0.04889	0.00837	0.01592	0.00248	0.00242	0.00006	142.7	359.2	16.0	2.5	15.6	0.4
JM5204-155.2-5	693.4	1125.8	0.6	0.05444	0.00812	0.01660	0.00226	0.00238	0.00008	390.8	340.7	16.7	2.3	15.3	0.5
JM5204-155.2-6	672.8	866.5	0.8	0.05586	0.01398	0.01692	0.00390	0.00256	0.00012	455.6	468.5	17.0	3.9	16.5	0.8
JM5204-155.2-7	1030.5	1780.5	0.6	0.05097	0.00464	0.01611	0.00128	0.00243	0.00006	239.0	209.2	16.2	1.3	15.6	0.4
JM5204-155.2-8	515.0	487.7	1.1	0.05610	0.01259	0.01728	0.00403	0.00248	0.00011	457.5	442.6	17.4	4	16.0	0.7
JM5204-155.2-9	4946.8	2672.1	1.9	0.05505	0.00482	0.01731	0.00142	0.00249	0.00009	413.0	196.3	17.4	1.4	16.0	0.6
JM5204-155.2-10	674.8	1159.8	0.6	0.04656	0.01047	0.01495	0.00331	0.00253	0.00009	33.4	466.6	15.1	3.3	16.3	0.6
JM5204-155.2-11	587.6	1225.1	0.5	0.04731	0.00747	0.01529	0.00241	0.00245	0.00007	64.9	401.8	15.4	2.4	15.8	0.4
JM5204-155.2-12	678.7	786.3	0.9	0.05187	0.00792	0.01773	0.00247	0.00260	0.00009	279.7	314.8	17.8	2.5	16.7	0.6
JM5204-155.2-13	1339.4	1982.0	0.7	0.05191	0.00755	0.01593	0.00248	0.00233	0.00007	283.4	300.0	16.0	2.5	15.0	0.5
JM5204-155.2-14	551.8	1163.3	0.5	0.05324	0.00905	0.01534	0.00257	0.00221	0.00008	338.9	344.4	15.5	2.6	14.3	0.5
JM5204-155.2-15	718.1	1238.9	0.6	0.04876	0.00761	0.01552	0.00253	0.00238	0.00007	200.1	277.7	15.6	2.5	15.4	0.4
JM5204-155.2-16	480.2	1231.9	0.4	0.04745	0.01126	0.01516	0.00365	0.00228	0.00009	77.9	488.8	15.3	3.7	14.7	0.6
JM5204-155.2-17	482.2	1111.0	0.4	0.06068	0.01257	0.01694	0.00306	0.00245	0.00008	627.8	457.4	17.1	3.1	15.8	0.5
JM5204-155.2-18	514.3	970.3	0.5	0.05376	0.00871	0.01634	0.00263	0.00237	0.00009	361.2	338.8	16.5	2.6	15.3	0.6
JM5204-155.2-19	835.0	1077.7	0.8	0.05853	0.01541	0.01634	0.00319	0.00236	0.00013	550.0	488.9	16.5	3.2	15.2	0.8
JM5204-155.2-20	561.4	1095.7	0.5	0.05553	0.00970	0.01732	0.00256	0.00253	0.00009	435.2	348.1	17.4	2.6	16.3	0.6

注:测试单位为中国地质大学(北京);测试者:相鹏。

岗闪长斑岩进行锆石U-Pb年龄学分析,获得锆石结晶年龄为(15.5±0.3)Ma。将该含矿斑岩与主矿段的含矿斑岩对比分析发现,主矿段中花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩以及闪长玢岩的结晶时代主要集中于14.1~16.0 Ma(表1)(应立娟等,2011),说明南坑矿段与主矿段岩浆活动时限一致,均为中新世岩浆活动的产物。

此外,对于成矿作用时代,由于南坑矿段花岗闪长斑岩为含矿斑岩,所以,其成矿作用应与花岗闪长斑岩一致或略晚。项目组也对南坑矿段矽卡岩矿石中的辉钼矿进行Re-Os同位素定年,结果显示,辉钼矿的Re-Os同位素年龄为15.26~15.38 Ma,其等时线年龄为(15.23±0.22)Ma(唐攀等,2021)。所以,辉钼矿的成矿时代,在误差范围内,与花岗闪长斑岩的结晶年龄基本一致。至此,可以判定甲玛矿区南坑矿段含矿斑岩成岩成矿时代与主矿段一致,均为中新世中酸性岩浆活动的产物,是甲玛中心复合成矿作用模型的重要组成部分(林彬等,2019)。

6.2 南坑矿段矽卡岩矿体成因

南坑矿段作为甲玛斑岩成矿系统的重要组成部分,其矿体成因也可以由以下证据加以判定:

基础地质特征:南坑矿段与成矿作用有关的岩性单位主要为大理岩、角岩和矽卡岩,其中,矽卡岩主要产于大理岩和角岩的接触带,是中酸性岩浆热液流体与二者接触交代后蚀变形成的产物(图4)。同时,大理岩和角岩中均发育未蚀变完全的矽卡岩,残留原大理岩或角岩组分。矽卡岩的热液来源于中酸性侵入体,所以其成矿作用应与隐伏斑岩体有关(邹兵等,2019)。

矿化与岩体的耦合关系:从多个钻孔中揭露的花岗闪长斑岩中清晰显示,花岗闪长斑岩虽然并没有像矽卡岩矿石一样发育强铜多金属矿化,但从花岗闪长斑岩与大理岩的接触带,已经形成了石榴子石矽卡岩化蚀变和铜铅锌矿化(图4)。花岗闪长斑岩本身也发育明显的绿泥石化蚀变和弱的浸染状黄铁矿、黄铜矿、脉状闪锌矿等矿化(图5b)。所以,认为花岗闪长斑岩不仅是含矿斑岩,也可能是致矿的斑岩体之一。

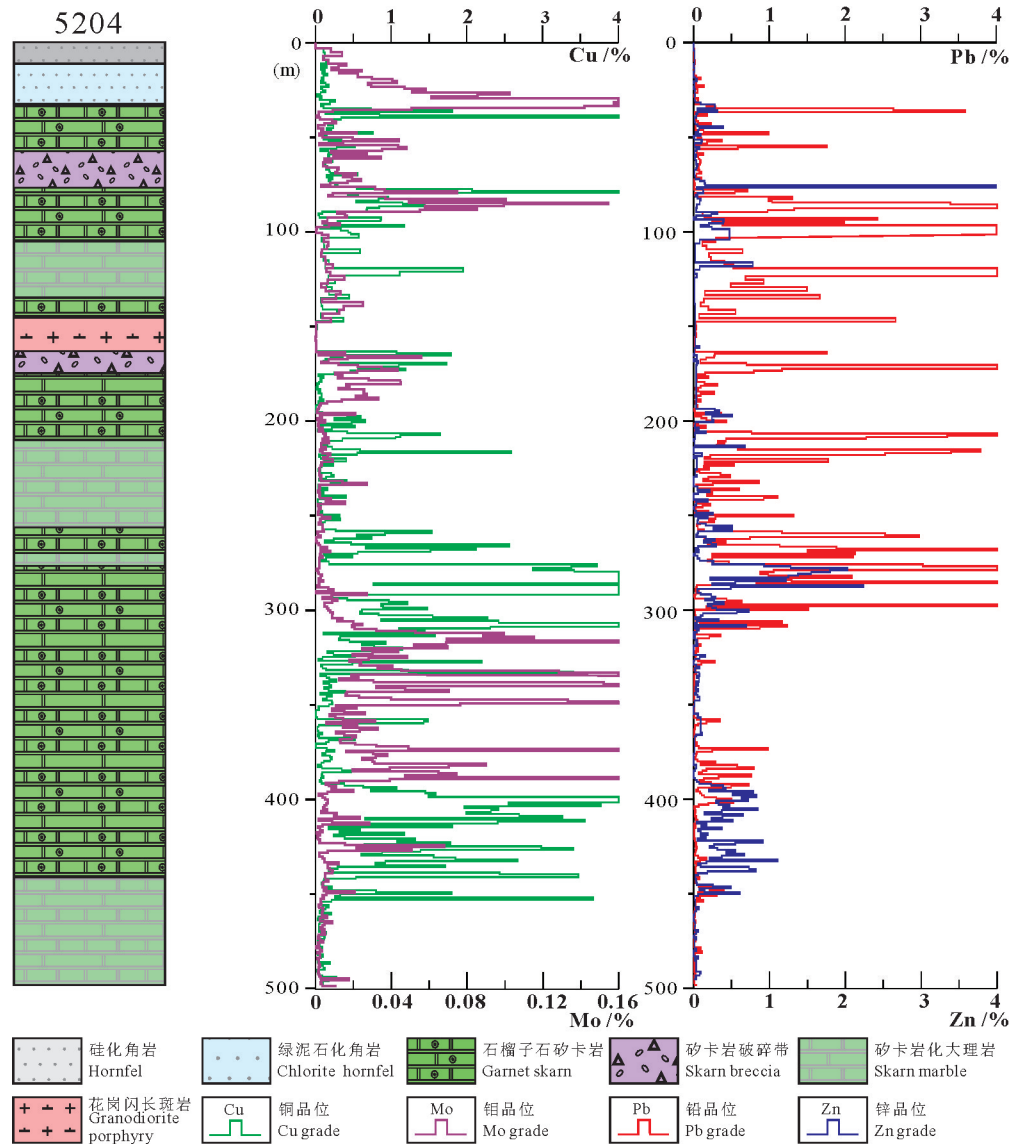


图4 南坑矿段ZK5204 地质和矿化结构特征

Fig.4 Geological and mineralized structures of borehole 5204 in South-Pit

其侵位时代也近似代表了矽卡岩成岩(热液接触交代)和金属硫化物沉淀的时间。

矿化结构特征:南坑矿段的矿体主要赋存在矽卡岩中,而矿石类型多以中等浸染状、块状为主,金属矿物则主要为黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿(图2,图5)。其中,矿化主要赋存在矽卡岩中、少量赋存在斑岩、角岩和大理岩中。金属矿物主要呈半自形粒状或他形不规则状充填于石榴子石粒间或呈脉状、团斑状产出。铜钼矿化主要产于矽卡岩与角岩接触界线和石榴子石矽卡岩中(图4)。而铅锌矿化则主要产于矽卡岩以及矽卡

岩化大理岩中。呈现从热液中心(斑岩体)向外围,由铜钼矿化逐步过渡为铅锌矿化的现象,局部可见富铅锌(铜)矿化脉直接产于大理岩中(图5a),表现出Manto型矿石特征(Meinert, 2005)。所以,就矿石类型与结构而言,南坑矿体具有典型的斑岩-矽卡岩型矿体特征。

综合上述特征,可以判定,南坑矿段矿体成因为岩浆热液接触交代成因,其成矿作用与中新世的中酸性斑岩体侵位有关。

6.3 南坑矿段构造控制因素

前人对甲玛矿区的构造解译,根据一系列的褶

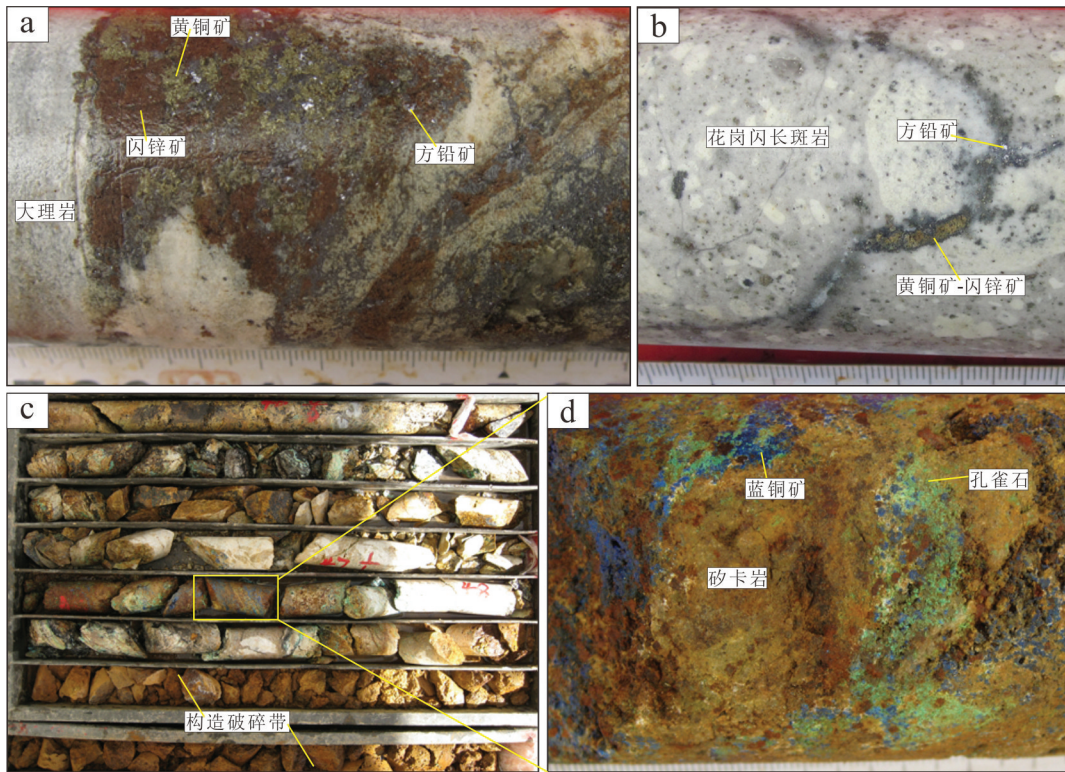


图5 南坑矿段典型矿化与构造特征

a—大理岩中产出的黄铜矿-闪锌矿-方铅矿脉;b—花岗闪长斑岩发育黄铜矿-闪锌矿-方铅矿脉;c—矽卡岩矿体中发育构造破碎带;d—矽卡岩氧化破碎并发育蓝铜矿和孔雀石

Fig.5 characteristics of mineralization and structure of South-pit

a—Chalcopyrite-sphalerite-galena vein in the marble;b—Chalcopyrite-sphalerite-galena veinlet in granodiorite porphyry;c—Structure breccia in skarn ore-body;d—Oxidized skarn ore with azurite and malachite

皱变形和花岗岩脉变形痕迹,认为中新世岩体侵位主要受控于甲玛—卡军果推覆构造控制,即岩体主要沿推覆褶皱的虚脱空间侵入,中酸性岩浆热液流体沿灰岩(已蚀变为大理岩)与砂岩(已蚀变为角岩)的层间扩容带与上下组分发生强烈的物质交换,从而交代形成厚大的矽卡型铜多金属矿体(冷秋锋等, 2015a)。所以,从控矿构造时限上,推覆构造应早于斑岩体侵位和矽卡岩成矿时限。根据区域地质构造演化证据,认为甲玛—卡军果推覆构造体系是印度板块与欧亚板块碰撞引发的,具有递进变形、从盆地中心向边缘推覆、新地层盖老地层的特征(钟康惠等, 2012)。矿区尺度内外,受控于推覆构造体系的中酸性岩浆岩最早侵位于 45 Ma,与区域强烈岩浆活动时限一致。考虑到岩浆活动多发生于强变形后的松弛期,所以推测推覆构造的起始时间为 50 Ma,与冈底斯地区强烈隆升时限基本一致(钟康惠等, 2012)。

然而,南坑矿段厚大的铜多金属矿体不仅受控

于推覆构造,也受滑覆构造的控制。滑覆构造是甲玛—卡军果推覆构造体系的重要组成部分之一,是由北向南逆冲推覆过程中,因背斜顶部高位岩块自身重力失稳,沿层间滑脱带向北滑覆形成的构造体系。主滑覆面为甲玛矿区红塔背斜北翼的多底沟组和林布宗组层间接触带。滑覆构造根据不同区位的构造形态,可以细分为后部带、中部带和前部带(图6)。其中,后部带主要见于铜山南部至东风垭一带,岩块内平行于滑动面的剪断裂,由众多多底沟组碳酸岩块组成,形成一系列的S型褶曲以及M型褶皱,局部可见重褶曲。中部带则是滑覆体的主体,主要由顺层褶叠的林布宗组碎屑岩和多底沟组碳酸岩块组成,顶部因碎石覆盖,构造较难识别,但底部碳酸岩中可见S型褶曲。同时,中部发育少量花岗质岩脉,部分发育片理化,可能暗示受到后期构造的影响。前部带位于铜山与莫古朗一带,以多底沟组碳酸盐岩为主,发生上冲或下插(图6)。地表可见上冲形成的Z型褶曲,局部可见碳酸岩的

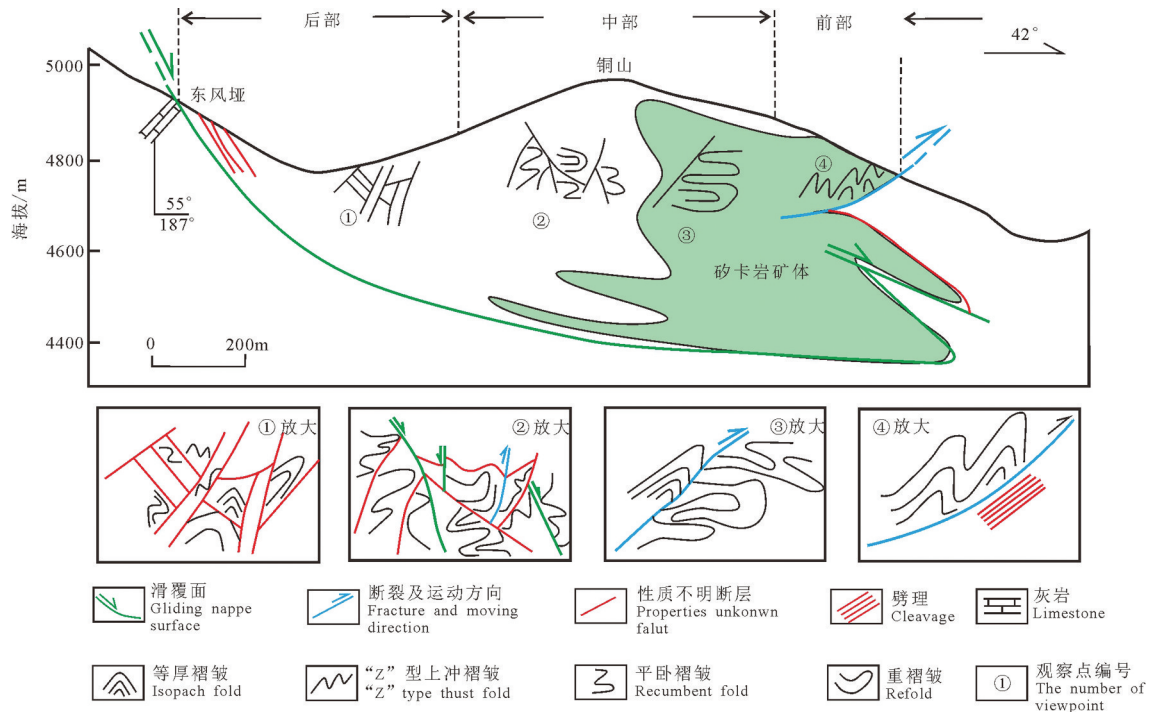


图6 甲玛矿区南坑矿段滑覆构造解译图(据钟康惠等,2012修改)

Fig.6 Sketch of sliding nappe fault of South-Pit, Jiama deposit (modified from Zhong Kanghui et al., 2012)

“飞来峰”。在多底沟组与林布宗组的碳酸岩发生强烈的矽卡岩化和金属矿化,形成了厚大的矽卡岩型铜铅锌矿体。矿体形成后,有明显的断裂破坏的痕迹(钟康惠等,2012;邹兵等,2019)(图2)。

通过钻孔的详细编录,多个钻孔中可见清晰的连续裂隙或破碎带,可能是滑覆构造后部带断裂的痕迹。首先,这些破碎带可以穿过含矿的花岗闪长斑岩,致使花岗闪长斑岩形成明显的角砾岩化,破裂面也因为氧化形成大量的褐铁矿化。其次,在完整的矽卡岩矿体中,也发育多处泥化或氧化破碎带,破碎带中矽卡岩呈粉碎状、硅灰石等矿物呈现弱泥化,同时发育明显的孔雀石化和蓝铜矿化(图5d)。结合矿化品位分析,矽卡岩破碎带铜钼、铅锌品位呈现骤降的特征,明显不同于上下段连续的高品位矿化(图4)。据此说明南坑矿段,滑覆构造应该晚于斑岩侵位和矽卡岩成岩成矿,而对已形成矿体造成明显的破坏,破碎带存在低品位矿物是因为后期流体沿破碎带的氧化淋滤导致的。

6.4 南坑矿段矽卡岩矿体与甲玛斑岩系统的关系及勘查和开采建议

甲玛矿床作为一个复杂斑岩成矿系统,受控于

多种控矿因素,也包含多种矿体类型(唐菊兴等,2013;冷秋锋等,2015a)。林彬等(2019)曾系统地梳理和总结了甲玛矿区的勘查评价过程,并结合不同矿段、不同矿体类型结构的精细解剖,创建了多中心复合成矿作用模型。同时,详细给出该成矿作用模型的基本地质要素及其与传统的斑岩成矿系统模型的差异(Sillitoe, 2010; 林彬等, 2019)。多中心复合成矿作用模型的核心是在斑岩成矿系统的基础上,进一步提出成矿流体从浅部岩浆房出溶后,可以沿多个热源中心向上运移或侵位,并形成彼此相互独立、局部叠加的成矿作用模型。该模型的建立不仅突破传统的单中心成矿作用模式,同时,也揭示斑岩成矿系统的斑岩型、矽卡岩型、角岩型以及远端破碎带金矿体的结构特征(郑文宝等,2012),从而为斑岩成矿系统不同矿体的成因判定和勘查评价指明方向(郭文铂等, 2014; 杨征坤等, 2019)。

根据多中心复合成矿模型,主矿段的斑岩、矽卡岩以及角岩型矿化均受控于深部隐伏侵位的大规模复式侵入体。该侵入体为成矿作用提供了充足的热液和大量的金属物质,所以在侵入体内部以

及围岩中,按一定分带次序呈现不同的矿化类型。从上述研究成果可以看出,南坑矿段与主矿段在成岩成矿时代上基本一致,但在空间上有一定分离。如果成矿流体来源于主矿段隐伏侵位的斑岩体,那么热液流体需要沿层间接触带长距离运移,且随着流体的运移,其金属矿化应该以铅锌或者更低温的金银矿物为主,而缺乏铜和钼等中高温矿化。同时,其矽卡岩矿物也应该主要为浅绿色透辉石或硅灰石为主。事实上,南坑矿段的矿化以高品位的铜铅锌矿化为主,同时深部发育明显的钼矿化。矽卡岩中也富含红棕色的石榴子石。所以,推测南坑矿段成矿热液可能并不来源于主矿段复式侵入体,而具有独立的热液来源。详细的钻孔编录,也显示南坑矿段西南端,ZK5285-5486等钻孔中,已初步揭示较大规模的含矿斑岩,同时,斑岩中发育大量的石英网脉和UST结构,有大量的流体出溶(图2)。同时,靠近流体出溶区域,主要为高品位铜的矿化和钼矿化,远离岩体则逐步过渡为铅锌铜矿化(邹兵等,2019)。据此,也印证南坑矿段存在独立的热液中心,可能与矿段西南部的隐伏斑岩侵位有关。所以,南坑矿段成矿作用与主矿段一致,均为甲玛斑岩成矿系统多中心复合成矿作用的产物,但南坑矿段可能存在独立的热液中心。

对于南坑矿段后续的勘查评价,主要有以下建议:

(1)进一步评价深部岩体含矿性,定位隐伏热液中心。针对南坑矿区西南部多个钻孔中揭露的含矿斑岩,进行详细的矿化蚀变分析,利用蚀变分析和矿化强度,以及斑岩体自身的结构特征,准确定位隐伏热液侵位中心。

(2)详细解剖矽卡岩矿体的矿物分带和矿化分带。对南坑矿区厚大的矽卡岩型矿体进行系统的科学编录,详细划分不同矽卡岩矿物(透辉石、石榴子石、硅灰石)的颜色、矿物比例等空间分带特征,同时,对钼、铜、铅锌、金银等空间分带规律进行系统总结,进一步判定热液流体演化和运移路径。

(3)注重成矿后断裂对已形成矿体的错断现象,避免错失经济矿体。目前,南坑矿段多个钻孔中均出现断裂的破坏现象,导致断裂带富集矿化发生明显淋滤和流失。然而,经过断裂带以后,又探获新的经济矿体。所以,在后续的勘查中,应注意成矿后断

裂的破坏现象,避免错失深部的经济矿体。

7 结 论

通过上述研究,本文主要获得以下结论:

(1)南坑矿段矽卡岩矿体成矿作用与中新世斑岩体侵位有关,是中酸性岩浆热液与大理岩、角岩接触交代形成的产物。

(2)锆石U-Pb测年揭示,南坑矿段含矿花岗岩长斑岩侵位时代为15.5 Ma,与矽卡岩成矿时代一致。

(3)南坑矿段内滑覆构造形成于斑岩体侵位和成矿作用之后,对已形成矿体有明显的破坏作用。

(4)南坑矿段作为甲玛矿床多中心复合成矿作用模型的重要组成部分,可能存在独立的热液中心。

致谢:中国地质大学(北京)相鹏老师在锆石LA-ICP-MS U-Pb定年中给予了很多的帮助,匿名审稿专家提出了宝贵意见和建议,中国黄金集团对项目实施给予了大力支持,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Cooke D R., Hollings P, Walsh J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100: 801-818.
- Duan J L, Tang J X, Mason R, Zheng W B, 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.
- Guo Wenbo, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Ying Lijuan, Wang Yiyun, Tang Pan. 2014. Geochemical behavior of elements during formation and mineralization processes of skarn in the Jiama copper polymetallic deposit of Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 50(3): 397-410.
- Guo N, Cudahy T, Tang J, 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*, 108: 147-157.
- 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, McCuaig T C. 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa Terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Economic Geology*, 110: 1541-1575.
- Leng Qiufeng, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Lin Bin, Wang Yiyun,

- Tang Pan, Lin Xin. 2015a. 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 Qiufeng, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Zhang Jinshu, Tang Pan, Yan Gang, Dong Yu. 2015b. Re-Os dating of molybdenite from the Lakange porphyry Cu-Mo deposit in Tibet and its geological significance[J]. *Geology in China*, 42(2): 570–584(in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Tang Juxing, Zhang Zhi, Zheng Wenbao, Leng Qiufeng, Zhong Wanting, Ying Lijuan. 2012. 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 Bin, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, He Wen, Liu Zhibo, Wang Yiyun, Li Yanbo, Yang Chao, Yang Huanhuan, Zhang Lejun, Li Yubin. 2018. Geology, alteration and mineralization of Tiegelongnan giant Cu (Au, Ag) deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 37(3): 917–939 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Tang Juxing, Tang Pan, Zheng Wenbao, Greg Hall, Chen Guoliang, Zhang Zhongkun. 2019. Polycentric complex mineralization model of porphyry system: A case study of Jiama superlarge deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1204–1222 (in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, Song Y, Greg H, Wang Q, Yang C, Fang X, Duan J L, Yang H H, Liu Z B, Wang Y Y, Feng J. 2017a. 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]. *Resource Geology*, 67(1): 1–21.
- Lin B, Chen Y C, Tang J X, Wang Q, Song Y, Yang C, Wang W L, He W, Zhang L J. 2017b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb–Sr ages of the Tiegelongnan porphyry Cu–(Au) deposit in the Bangong Co–Nujiang metallogenic belt of Tibet, China: Implication for generation of super-large deposit[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 91(2): 602–616.
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, Michael B, Song Y, Yang H H, Wang Q, He W, Liu Z B. 2019. Geology and geochronology of Naruo large porphyry – breccia Cu deposit in the Duolong district, Tibet [J]. *Gondwana Research*, 66: 168–182.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Detlef G, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43.
- Liu Jun, Huang Bo, Yang Tao, Xu Weijun, Liu Min, Cao Qichen. 2019. Analysis on the super-large porphyry copper deposits in the world[J]. *Geology and Resources*, 28(4): 345–349, 400(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546.
- Mao Jingwen, Luo Maocheng, Xie Guiqin, Liu Jun, Wu Shenghua. 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).
- Meinert L, Dipple G M, Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 100: 299–336.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105: 3–41.
- Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, Zhong Kanghui, Ying Lijuan, Zheng Wenbao, Li Fengji, Guo Na, Qin Zhipeng, Yao Xiaofeng, Li Lei, Wang You, Tang Xiaoqian. 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 Juxing, Deng Shilin, Zheng Wenbao, Ying Lijuan, Wang Xiongwu, Zhong Kanghui, Qin Zhipeng, Ding Feng, Li Fengji, Tang Xiaoqian, Zhong Yufeng, Peng Huijuan. 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 Juxing, Wang Liqiang, Zheng Wenbao, Zhong Kanghui. 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 Juxing, Wang Qin, Yang Chao, Ding Shuai, Lang Xinghai, Liu Hongfei, Huang Yong, Zheng Wenbao, Wang Liqiang, Gao Yiming, Feng Jun, Duan Jilin, Song Yang, Wang Yiyun, Lin Bin, Fang Xiang, Zhang Zhi, Yang Huanhuan. 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 Pan, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Leng Qiufeng, Lin Bin, Tang Xiaoqian, Wang Hao, Gao Xin, Zhang Zebin, Zhou Hongbing. 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).
- Wang Denghong, Tang Juxing, Ying Lijuan, Lin Bin, Ding Shuai. 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 Yiyun, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Leng Qiufeng, Tang Pan, Ding Shuai, Zhou Yun. 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).

- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1–23.
- Yang Z M, Goldfarb R J, Chang Z S. 2016. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by subduction of the Indian continental plate[J]. *Special Publication*, 19: 279–300.
- Yang Z M, Cooke D R. 2019. Porphyry copper deposits in China. *Economic Geology SEG Special Publications*, 22: 133–187.
- Yang Zhenkun, Xing Tianyu, Zhang Zhongkun, Lin Bin, Tang Pan, He Jian, Cizhen Baisang, Jian Haijun, Yang Yang, Wu Chunheng, Wu Xin. 2019. Prospecting direction of Jiama super–large porphyry metallogenic system in Tibet[J]. *Gold Science and Technology*, 27: 648–658 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xiaofeng, Ye Tianzhu, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Ding Shuai, Li Yongsheng, Zhen Shimin. 2014. The effect of Si–Ca interface on skarn formation and polymetallic mineralization in the Jiama deposit, Tibet[J]. *Geology in China*, 41(5): 1577–1593(in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang C H, Tang J X, Wang D H, Qu W J, Li C. 2014. Re–Os systematics of sulfides (chalcopyrite, bornite, pyrite and pyrrotite) from the Jiama Cu–Mo deposit of Tibet, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 497–506.
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, Chang Zhesheng, Qu Wenjun. 2010. Re–Os dating of molybdenite occurring in different rocks from the Jiama copper deposit in Tibet and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1165–1174(in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Tang Juxing, Wang Denghong, Zheng Wenbao, Qin Zhipeng, Zhang Li. 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.
- Zhang Zebin, Tang Juxing, Tang Pan, Chen Guoliang, Zhang Zhongkun, Gao Xin, Yang Yang. 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, Zhong K H, Ying L J, Leng Q F, Ding S, Lin B. 2016. Geology of the Jiama porphyry copper–polymetallic system, Lhasa Region, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 74: 151–169.
- Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Song Xin, Tang Juxing, Ying Lijuan, Li Fengji, Tang Xiaoqian. 2020. Element distribution of Jiama copper–polymetallic deposit in Tibet and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 29(5): 775–784 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenbao, Tang Juxing, Li Fengji, Ying Lijuan Wang Huan, Tang Xiaoqian. 2011. Genesis and prospecting significance of lead–zinc ore bodies in Jiama mining area, Tibet[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 337–350 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenbao, Tang Juxing, Wang Xiongwu, Wang Huan, Ying Lijuan, Zhong Yufeng, Zhong Wanting. 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).
- Zhong Kanghui, Li Lei, Zhou Huiwen, Bai Jinguo, Li Wei, Zhong Wanting, Zhang Yongqiang, Lin Jiqing, Zheng Fanshi, Huang Xiaoyu, Lu Biao, Lei Bo. 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).
- Zhou Yun, Wang Xiongwu, Tang Juxing, Qin Zhipeng, Peng Huijuan, Li Aiguo, Yang Ke, Wang Hua, Li Jiong, Zhang Ji. 2011. Origin and evolution of ore–forming fluids from Jiama copper polymetallic deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 231–248 (in Chinese with English abstract).
- Zou Bin, Lin Bin, Zheng Wenbao, Song Yang, Tang Pan, Zhang Zebin, Gao Xin. 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).

附中文参考文献

- 郭文铂, 唐菊兴, 郑文宝, 应立娟, 王艺云, 唐攀. 2014. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩形成及矿化过程中的元素地球化学行为[J]. *地质与勘探*, 50(3): 397–410.
- 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 林彬, 王艺云, 唐攀, 林鑫. 2015a. 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, 唐菊兴, 郑文宝, 张金树, 唐攀, 严刚, 董宇. 2015b. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 42(2): 570–584.
- 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.
- 林彬, 陈毓川, 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 贺文, 刘治博, 王艺云, 李彦波, 杨超, 杨欢欢, 张乐骏, 李玉彬. 2018. 西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿床地质、蚀变与矿化[J]. *矿床地质*, 37(3): 917–939.
- 林彬, 唐菊兴, 唐攀, 郑文宝, Greg Hall, 陈国良, 张忠坤. 2019. 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[J]. *矿床地质*, 38: 1204–1222.
- 刘军, 黄波, 徐伟钧, 徐伟钧, 刘敏, 曹其琛. 2019. 全球超大型斑岩铜矿浅析[J]. *地质与资源*, 28(4): 345–349, 400.
- 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.
- 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): 339-348.
- 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. 2021. 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.
- 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.
- 杨征坤, 行天纬, 张忠坤, 林彬, 唐攀, 赫健, 次真白桑, 焦海军, 杨阳, 吴纯能, 吴鑫. 2019. 西藏甲玛超大型斑岩成矿系统找矿方向[J]. 黄金科学技术, 27: 648-658.
- 姚晓峰, 叶天竺, 唐菊兴, 郑文宝, 丁帅, 李永胜, 甄世民. 2014. 西藏甲玛矿床硅钙界面对矽卡岩成岩及多金属成矿的影响[J]. 中国地质, 41(5): 1577-1593.
- 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床辉钼矿 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.
- 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, 陈毓川, 宋鑫, 唐菊兴, 应立娟, 黎枫佶, 唐晓倩. 2010. 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): 775-784.
- 郑文宝, 唐菊兴, 黎枫佶, 应立娟, 王焕, 唐晓倩. 2011. 西藏甲玛矿区铅锌矿体成因研究及其找矿意义[J]. 高校地质学报, 17(2): 337-350.
- 郑文宝, 唐菊兴, 汪雄武, 王焕, 应立娟, 钟裕峰, 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.
- 周云, 汪雄武, 唐菊兴, 秦志鹏, 彭慧娟, 李爱国, 杨科, 王华, 李炯, 张继. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿流体来源及演化[J]. 矿床地质, 30(2): 231-248.