

doi: 10.12029/gc20220411

杨征坤, 杨阳, 张忠坤, 林彬, 赫健, 张泽斌, 高福太, 唐晓倩, 唐攀, 祁婧, 李怡萱. 2022. 西藏甲玛矿床磁黄铁矿微量元素特征及其与金富集沉淀的耦合机制[J]. 中国地质, 49(4): 1198–1213.

Yang Zhengkun, Yang Yang, Zhang Zhongkun, Lin Bin, He Jian, Zhang Zebin, Gao Futai, Tang Xiaoqian, Tang Pan, Qi Jing, Li Yixuan. 2022. Geochemistry of pyrrhotite in the Jiama deposit, Tibet and its relationship with gold enrichment and precipitation [J]. Geology in China, 49(4): 1198–1213(in Chinese with English abstract).

西藏甲玛矿床磁黄铁矿微量元素特征及其与金富集沉淀的耦合机制

杨征坤¹, 杨阳², 张忠坤¹, 林彬³, 赫健¹, 张泽斌⁴,
高福太¹, 唐晓倩⁵, 唐攀⁶, 祁婧⁴, 李怡萱⁴

(1. 西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850200; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 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; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 北京中矿联咨询中心, 北京 100044; 6. 西南科技大学环境与资源学院, 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

提要:【研究目的】甲玛矿床是西藏冈底斯成矿带最重要的斑岩成矿系统之一, 具有斑岩、矽卡岩、角岩、脉状金矿四位一体矿体结构, 形成了丰富的矿物种类和多样的金属矿化。其中, 磁黄铁矿作为重要的金属矿物之一, 其矿物地球化学特征以及与金矿化的耦合关系一直不明确。【研究方法】此次, 以甲玛斑岩成矿系统外围和远端的不同产状的磁黄铁矿为研究对象, 基于详细的野外地质调查和镜下鉴定, 通过激光剥蚀电感耦合等离子质谱分析方法(LA-ICP-MS)对不同产状的磁黄铁矿开展测点分析和扫描分析, 详细揭示其地球化学特征。【研究结果】结果显示, 甲玛矿床磁黄铁矿主要富集 Co、Ni、Cu、Zn、Ge、Se, 弱富集 Pb、Bi、Sb、Te、Ag、As, 而 Mo、Cd、In、Sn、Ba、W、Au、Tl、Th、U 等元素含量较低。其中, 矽卡岩中的磁黄铁矿具有较高的 Co/Ni 比值, 能有效揭示其岩浆热液成因, 而角岩中磁黄铁矿可能继承了一定的沉积特征。【结论】甲玛矿区磁黄铁矿的 Cu、Zn、Pb 含量变化特征与矿床空间矿化规律一致。矽卡岩中的块状磁黄铁矿与金矿化关系密切, 金主要呈他形、不规则的独立金矿物产于磁黄铁矿的孔隙和粒间。同时, 金的富集和沉淀可能与富铋的熔体有关。

关键词: LA-ICP-MS; 微量元素; 磁黄铁矿; 斑岩型铜矿; 金矿化; 甲玛; 西藏

创新点: 磁黄铁矿是甲玛超大型斑岩成矿系统中典型的金属矿物之一, 其微区原位分析清晰揭示其微量元素地球化学特征和矿物成因, 同时, 证实矽卡岩中磁黄铁矿的高品位金与成矿流体中的富铋熔体有关。

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2022)04-1198-16

Geochemistry of pyrrhotite in the Jiama deposit, Tibet and its relationship with gold enrichment and precipitation

收稿日期: 2020-06-21; 改回日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划-深地专项(2018YFC0604101)、中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费(KJ2102、KK2017)、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)和中国地质调查局项目(DD20190167)联合资助。

作者简介: 杨征坤, 男, 1983年生, 工程师, 从事矿山地质探矿与生产管理工作; Email: yzk-0902@163.com。

通讯作者: 杨阳, 男, 1992年生, 博士生, 主要从事矿产勘查和综合研究; E-mail: nickyang87@126.com。

YANG Zhengkun¹, YANG Yang², ZHANG Zhongkun¹, LIN Bin³, HE Jian¹, ZHANG Zebin⁴,
GAO Futai¹, TANG Xiaoqian⁵, TANG Pan⁵, QI Jing⁴, LI Yixuan⁴

(1. Huatailong Mining Development co. LTD, Tibet, Lhasa 850200, Tibet, China; 2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. MNR key Laboratory of Metallogeny and mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. China Mining Federation of Beijing Consulting Center, Beijing 100044, China; 6. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, Ministry of Education, School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] As one of the most important porphyry metallogenic systems in Gangdese metallogenic belt in Tibet, Jiama has a four in one orebody structure of porphyry, skarn, hornfels, and vein gold ore-body, forming riched minerals and diverse metal mineralization. Pyrrhotite is one of the important metal minerals, and its mineral geochemistry and relationship with gold mineralization are still obscure. **[Methods]** The mineralogy and geochemistry of pyrrhotite in different occurrences of the Jiama porphyry system are the main objects for this paper according to detailed field geological survey, petrography, and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) analysis. **[Results]** The results show that pyrrhotite is obviously enriched in Co, Ni, Cu, Zn, Ge, and Se, and weakly enriched in Pb, Bi, Sb, Te, Ag, and As, and low content of Mo, Cd, In, Sn, Ba, W, Au, Tl, Th, U, relatively. Moreover, the pyrrhotite from skarn has a high ratio of Co/Ni, represent the its magmatic-hydrothermal genesis, while the pyrrhotite hosted in hornfels shows sedimentary characteristics. **[Conclusions]** The variation of contents of Cu, Zn, and Pb in pyrrhotite are related to the spatial mineralization in the Jiama deposit. The massive pyrrhotite in skarn is closely related to gold mineralization and the gold is mainly anhedral or irregular free gold occurring in the cavity and boundary of pyrrhotite grains. The enrichment and precipitation of gold could be related to bismuth-rich melts in the ore-fluids.

Key words: LA-ICP-MS; trace elements; pyrrhotite; porphyry Cu deposit; gold mineralization; Jiama; Tibet

Highlights: Pyrrhotite is one of the important metal mineral in the Jiama deposit. The LA-ICP-MS analysis of pyrrhotite shows its geochemistry and genesis. The high-grade Au in pyrrhotite hosted in skarn could be related to the bismuth-rich melts in the ore-related fluids.

About the first author: YANG Zhengkun, male, born in 1983, engineer, engaged in the study of exploration and management of mine; E-mail: yzk-0902@163.com.

About the corresponding author: YANG Yang, male, born in 1992, doctor candidate, engaged in the study of exploration and metallogeny; E-mail: nickyang87@126.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0604101), Basic Research Fund of Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences (No. KJ2102, No. KK2017), Sciences and Technical Plan from Tibet (No. XZ201901-GB-24), the National Natural Science Foundation of China (No. 41902097), and the project of China Geological Survey (No. DD20190167).

1 引言

甲玛是西藏冈底斯铜矿成矿带最为重要的斑岩成矿系统之一,也是资源规模最大、矿化元素最多、勘查和研究程度最高的矿床之一(唐菊兴等, 2010, 2019; Lin et al., 2017a, 2017b, 2019)。诸多学者曾对其基础矿床地质特征(唐菊兴等, 2010)、成矿元素分布规律(郑文宝等, 2010)、成岩成矿年代

学(应立娟等, 2010; 秦志鹏等, 2013; Zheng et al., 2016)、成矿物质来源(郑文宝等, 2012)、成矿流体来源与演化(周云, 2010; 郭文铂等, 2014; 王艺云等, 2017)、控岩控矿构造(钟康惠等, 2012)、裂隙(脉体)系统特征(林彬等, 2012)、矽卡岩分带特征(冷秋锋等, 2015; Zheng et al., 2016)等方面开展了深入的研究,取得了丰硕的研究成果,并构建了详细的成矿模式和勘查评价模型(唐菊兴等, 2011)。

林彬等(2019)曾基于十余年的勘查实践,通过对甲玛斑岩成矿系统,不同矿体结构的精细解剖,结合高精度的年代学、高精度的岩石地球化学解译等工作,创建了“多中心复合成矿”作用模型,不仅揭示了不同矿化中心之间的耦合关系,也为甲玛矿区的深部及外围评价指明了方向。此外,更提出指针矿物在勘查评价研究中的重要意义。作为冈底斯成矿带碰撞造山成矿作用产物的典型代表,甲玛矿床富含数十种金属矿物和硅酸盐矿物,是开展精细矿物学研究的理论研究对象。尽管前人曾针对该矿床的斑铜矿、辉钼矿、白钨矿、石榴子石等矿物开展初步矿物学研究,而对其他的矿物则研究相对较弱,其对勘查评价的意义也不清楚(应立娟等,2010;王焕等,2011)。因此,如何针对甲玛超大型斑岩成矿系统,开展典型的指针矿物研究,揭示勘查评价指示意义,将是甲玛矿区矿物学和矿产勘查学研究的重要方向(林彬等,2021)。此外,甲玛矿床巨量的金矿化一直是区别于同区域驱龙、邦铺等矿床的重要标志,同时,金的矿化机制以及与其他金属矿物的耦合关系一直是待解难题。

随着电子探针、激光剥蚀技术以及离子探针等矿物微区分析技术的不断发展,使得精细揭示矿物微区元素地球化学特征成为可能,也有助于详细探究流体演化和元素迁移富集机制(Large et al., 2007; 叶甜等, 2015; Belousov et al., 2016)。基于此,本文以甲玛超大型矿床中较为丰富的磁黄铁矿为主要研究对象,通过细致的镜下观察,利用激光剥蚀原位分析技术,详细揭示其矿物地球化学特征,同时,结合其与金矿化的密切关系,探究其与金矿化的耦合机制,为进一步揭秘甲玛矿床矿物学特征、探究金矿化机制提供理论依据。

2 矿床地质背景

甲玛矿区位于西藏特提斯构造域,拉萨地体南部,冈底斯成矿带东段。区内出露地层简单,主要出露中生代侏罗系多底沟组灰岩、大理岩;白垩系林布宗组砂、板岩、角岩,以及少量沿沟谷分布的第四系残坡积物(图1)。其中,侏罗系多底沟组灰岩大理岩主要分布于矿区莫古郎以南—铜山—铅山一带以及北西部的牛马塘区域,作为矿床的底板分布在矿体下部,与下覆地层为不整合接触,多呈稳

定层状产出,局部可见少量透镜体。白垩系林布宗组砂、板岩、角岩主要分布于矿区莫古郎以北—铜山顶—夏工普沟—铅山垭口的广大地区,作为矿床的顶板分布在矿体上部。第四系主要由一些残坡积层、冲积层,由砂、砾石、粉质黏土、亚黏土组成,多分布矿区北西部的夏工普沟等山前坡地、冲沟及低洼处。

甲玛矿床具有典型的“四位一体”矿体结构,即斑岩、矽卡岩、角岩以及脉状金矿体等4种典型的矿体类型(图2)(唐菊兴等,2010)。

其中,斑岩型矿体总体上呈筒状产于矿区中部,主要受4条勘探线(16—32线)控制,目前资料显示斑岩侵位中心位于24线位置(图1),含矿斑岩体整体呈岩枝产出。矿体走向为北西—南东,延长大约500 m;近直立,垂向延伸>600 m(图2),矿体最大厚度区域出现在24线,向两侧至16线以西及32线以东矿体厚度逐渐减小。该矿体总体上以钼矿化为主,伴生明显铜矿化。则古朗北矿段Ⅱ号斑岩矿体是近年来新取得的重大找矿突破,主要位于矿区东北部则古朗矿段,发育典型的低品位厚大斑岩钼铜矿化,也进一步证实了甲玛矿床多中心复合成矿作用理论认识(林彬等,2019)。

矽卡岩矿体是甲玛矿床中最为重要的矿体类型,具有矿体规模巨大、品位富、分布范围广泛、成矿元素丰富,主要产于斑岩接触带以及上覆林布宗组砂板岩—角岩与下覆多底沟组灰岩—大理岩的层间构造带内的特点。受矿区构造作用影响,甲玛的矽卡岩矿体主要由I-1号矽卡岩主矿体、Ⅱ-1号矽卡岩主矿体和十多个次要矽卡岩矿体组成,其中I-1号矽卡岩主矿体主要受控于甲玛—卡军果推覆构造系,矿体规模宏大,多呈层状、似层状或厚板状产出(图2)。矿化主要为铜、钼、铅锌、金、银,局部有少量的钨、铋矿化。Ⅱ-1号矽卡岩主矿体(图2)主要受控于铜山滑覆构造,由于滑覆体内部的次级褶皱及裂隙构造十分发育,从而形成了钻孔及坑道中常见的角岩与矽卡岩互层的独特现象,同时为成矿流体的迁移和金属物质的沉淀提供了良好的通道及充分的空间,有利于厚大矽卡岩矿体的形成。其他次要矽卡岩矿体规模均为小型,形态多为透镜状,主要也受推覆构造和滑覆构造控制。同时矽卡岩的厚度受斑岩体影响较大,具有由近斑岩接

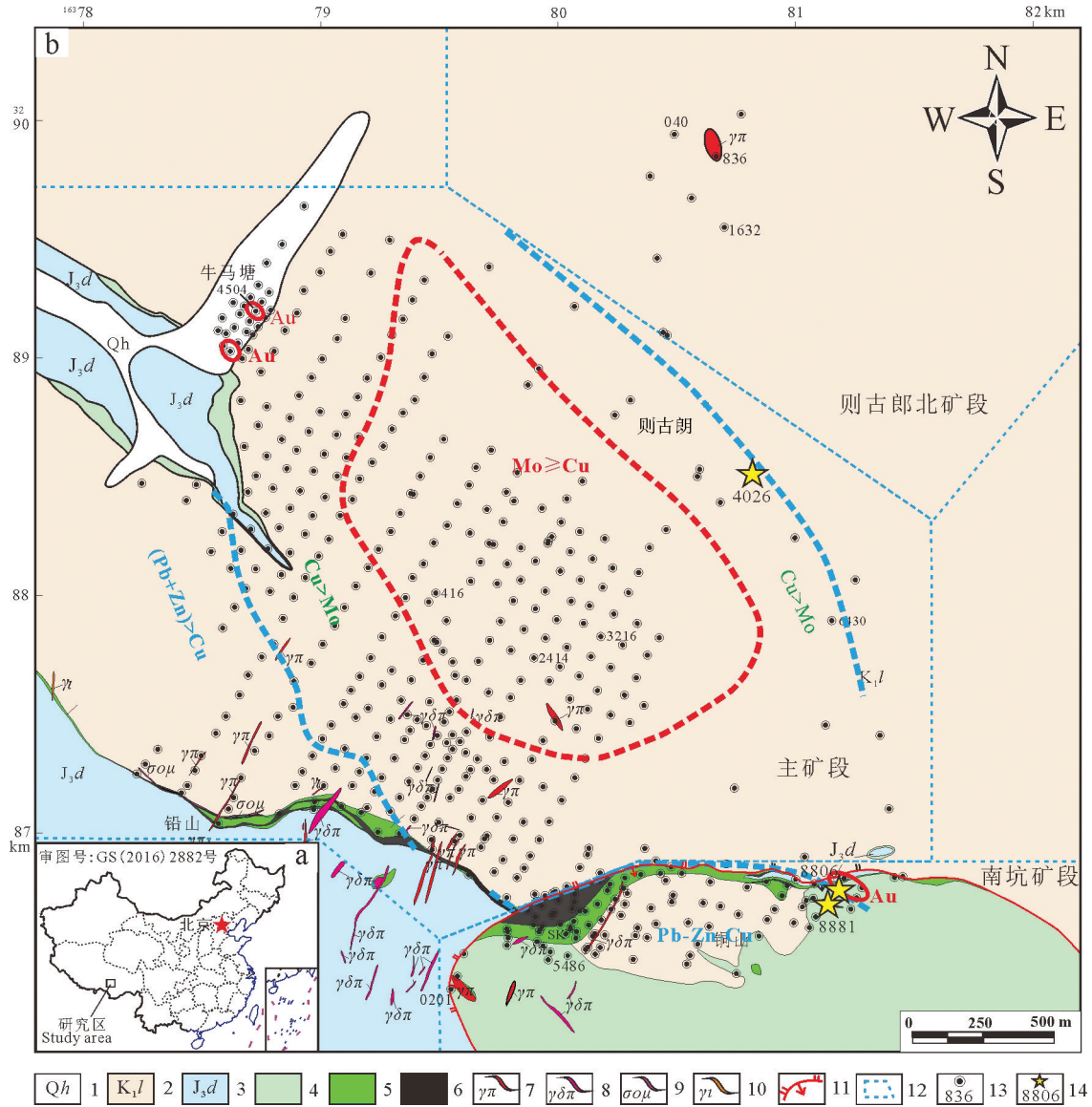


图1 甲玛矿区地质简图(据林彬等,2019)

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—细晶岩脉;11—滑覆构造断裂;12—矿段范围;13—钻孔及编号;14—取样位置

Fig.1 Geological map of 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 veins; 8-Granodiorite porphyry veins; 9-Quartz-diorite porphyry veins; 10-Aplite dike;11-Slip fault; 12-Segment of mining; 13-Drill hole and its serial number;14-Sample location

触带→中部带矽卡岩→远端矽卡岩,矿体厚度具有明显的由厚减薄的变化趋势。局部地区受滑覆构造影响如II-1号矽卡岩主矿体出现矿体厚度突然变厚的现象。矿体矿化以铜、铅、锌矿化为主,伴有钼、金、银矿化。

角岩型矿体整体上主要呈筒状,空间上位于深

部隐伏斑岩体和I-1号矽卡岩主矿体上部(图2),主要赋存在林布宗组地层围岩中,走向为北西-南东,延长约1300 m,近直立,垂向延伸达900 m,矿体中成矿元素在空间上具有明显的分带性,表现为“上铜下钼”的分带特征,是甲玛矿床另外一个重要的矿体类型,具有储量大、品位低的特征。角岩矿

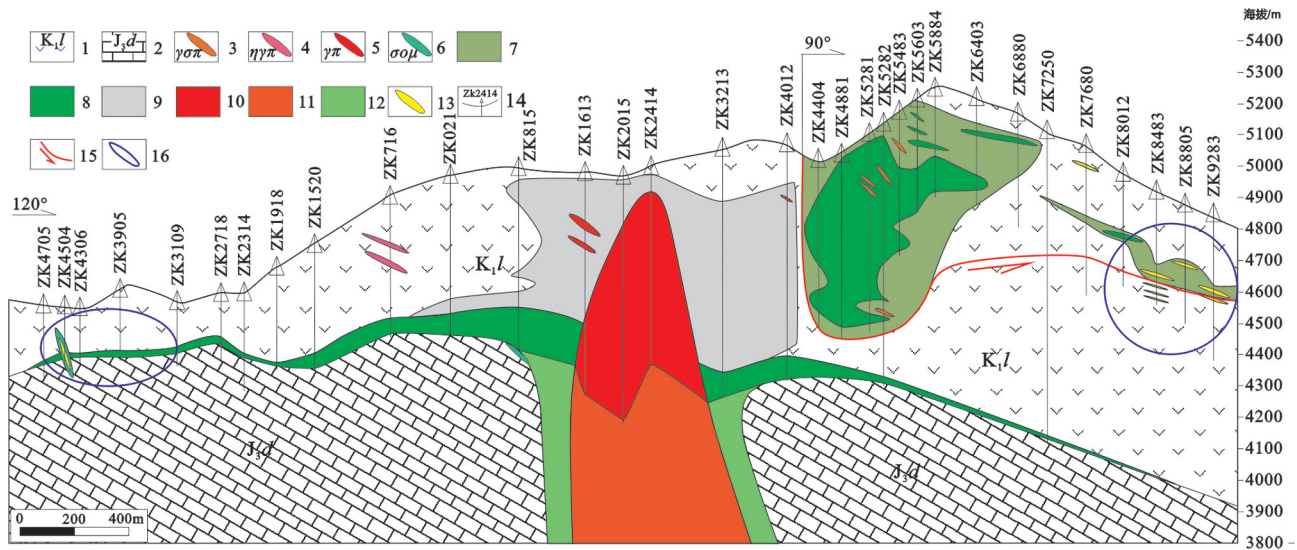


图2 甲玛矿床矿体结构剖面图(据邹兵等,2019修改)

1—林布宗组砂板岩、角岩;2—多底沟组灰岩、大理岩;3—花岗岩闪长斑岩;4—二长花岗斑岩;5—花岗斑岩;6—石英闪长玢岩;7—矽卡岩;8—矽卡岩型矿体;9—角岩型矿体;10—斑岩型矿体;11—推测斑岩型矿体;12—推测矽卡岩型矿体;13—独立的金矿体;14—钻孔位置;15—滑覆构造断裂;16—磁黄铁矿空间位置主要分布

Fig.2 Profile of ore-bodies in Jiama deposit(modified from Zou Bing et al., 2019)

1—Lin buzong Formation sand slate and hornfels; 2—Duodigou Formation limestone and marble; 3—Granodiorite porphyry; 4—Monzonitic granite porphyry; 5—Granite porphyry; 6—Quartz diorite porphyry;7—Skarn; 8—Skarn—type orebody; 9—Hornfels—type orebody; 10—Porphyry—type orebody; 11—Inferred porphyry—type orebody; 12—Inferred skarn—type orebody; 13—Gold orebody; 14—Drilling hole and its number; 15— Slip fault; 16— Spatial distribution of pyrrhotite

体主要是由于深部含矿斑岩体在侵位过程中,因“二次沸腾”、深部岩浆房退缩等机械力导致上覆地层脆性岩石角岩发生破碎,产生筒状裂隙系统而形成(林彬等,2012)。

脉状Au矿体主要产于外围构造蚀变带或晚期岩脉中,在空间上基本都位于距离矿区斑岩侵位中心大约1 km²范围外,多为浅成低温热液型矿(化)体。按赋矿围岩及赋存状态的不同,矿床中脉状Au矿体又可以进一步划分为产于板岩-角岩中的脉状Au矿体、产于矽卡岩中的脉状Au矿体以及产于石英闪长玢岩中的脉状Au矿体(郑文宝,2012)。

矿区内蚀变主要包括热接触变质作用形成的角岩化蚀变和大理岩化蚀变,以及热液交代变质作用形成的矽卡岩化蚀变和传统的斑岩系统蚀变。其中,斑岩系统蚀变总体上具有一定的蚀变分带特征,从岩体向外依次细分为钾硅化带-黄铁绢云母化带-弱泥化带+青磐岩化带。矿区内金属矿物丰富,主要有斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、镜铁矿、磁黄铁矿,含有少量铜蓝、蓝辉铜矿、自然铜、自然金、毒砂、孔雀石、褐铁

矿等。非金属矿物主要是石榴子石、透辉石、透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石、符山石、硅灰石等矽卡岩矿物和石英、斜长石、钾长石、黑云母、角闪石、方解石等造岩矿物,以及电气石、钠长石、钠黝帘石、绢云母、伊利石等蚀变矿物。

详细的钻孔编录和综合研究表明,甲玛矿区主要的成矿作用划分为岩浆期、气水-热液矿化期和风化期。其中,气水-热液矿化期又可细分为不同的成矿阶段,即矽卡岩-硅酸盐阶段、退化蚀变阶段、石英-铜硫化物阶段、石英-铜钼硫化物阶段、石英-铜铅锌硫化物阶段和石英-金成矿阶段(郑文宝,2012)。其中,磁黄铁矿主要发育在石英-金成矿阶段,该阶段主要指在矿区外围的板岩、石英闪长玢岩以及矽卡岩中均形成独立的脉状金矿。

3 磁黄铁矿产出特征

作为甲玛矿区重要的金属矿物之一,磁黄铁矿主要有两类产出状态,一类为产于矽卡岩(或矽卡岩化角岩)中的脉状、稠密浸染状或块状磁黄铁矿(图3a、b),另一类为产于砂、板岩或角岩中的脉状

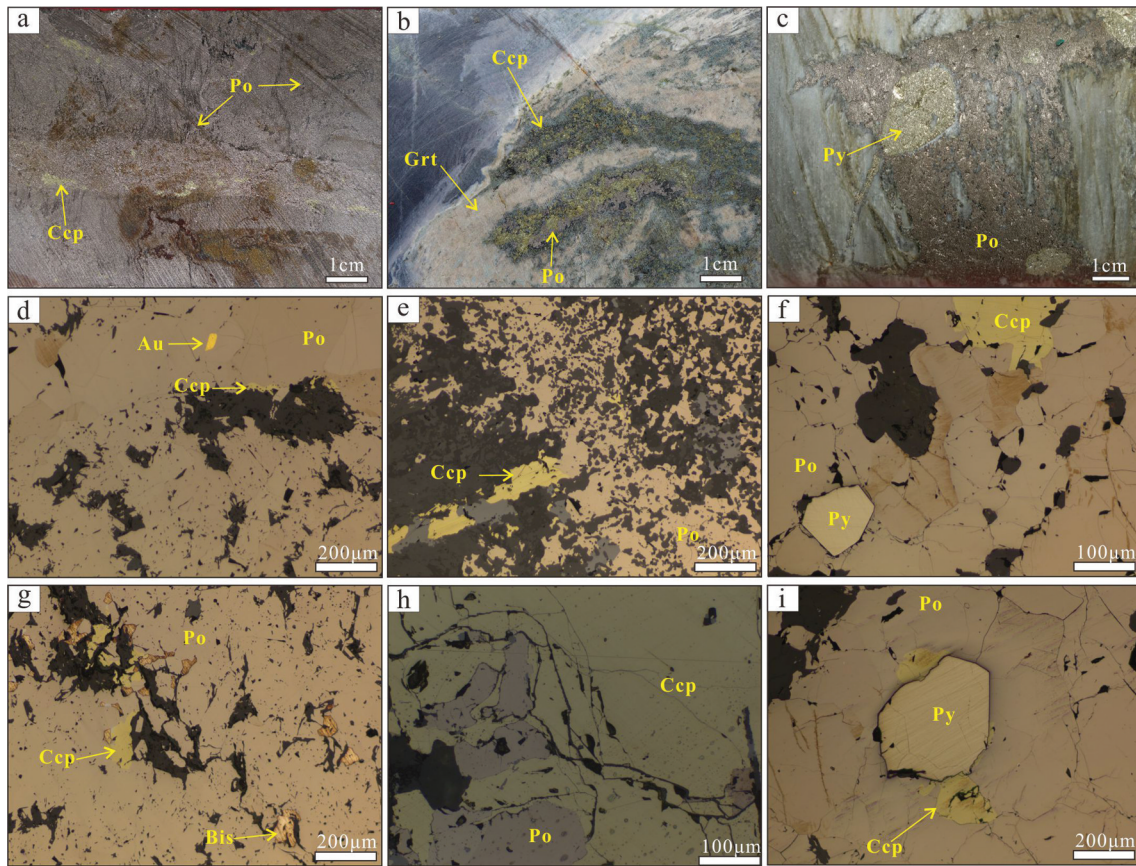


图3 甲玛矿床部分金属矿物显微照片

a—矽卡岩中产出的磁黄铁矿和黄铜矿；b—矽卡岩化角岩中产出的磁黄铁矿、黄铜矿和石榴子石；c—角岩中产出的磁黄铁矿和黄铁矿；d—磁黄铁矿中发育包裹银金矿；e—稠密浸染状的磁黄铁矿与黄铜矿共生，且早于磁黄铁矿；f—自形的黄铁矿和他形的黄铜矿被磁黄铁矿包围；g—他形一半自形稀疏浸染状产出的磁黄铁矿中发育黄铜矿和铋化物；h—他形磁黄铁矿被黄铜矿交代；i—自形的黄铁矿颗粒被黄铜矿和磁黄铁矿包裹；Po—磁黄铁矿；Ccp—黄铜矿；Py—黄铁矿；Au—含金矿物；Grt—石榴子石；Bis—含铋矿物

Fig.3 Microscopic photos of some metallic minerals in Jiama deposit

a—Pyrrhotite from skarn(Po); b—Pyrrhotite and Garnet (Grt) from skarnized marble(Mb); c—Pyrrhotite occurring in veins in hornstone; d—Electrum is wrapped in pyrrhotite; e—Chalcopyrite (Ccp) is associated with pyrrhotite; f—Automorphic pyrite and allomorphic chalcopyrite are surrounded by pyrrhotite; g—Chalcopyrite and bismuth compounds are developed in the pyrrhotite which occurs in the form of heteromorphic semi automorphic sparse disseminated form; h—Allomorphic pyrrhotite replaced by chalcopyrite; i—The self-generated pyrrhotite particles were surrounded by chalcopyrite and pyrite; Po—pyrrhotite; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite; Au—Au-bearing mineral; Grt—Garnet; Bis—Bi-bearing mineral

磁黄铁矿(图3c)。

其中,矽卡岩中的磁黄铁矿:主要分布在离斑岩体中心较远的铜山南坑矿段远端矽卡岩化大理岩和矽卡岩化角岩中。镜下呈古铜色,无内反射,未见明显非均质性,他形一半自形粒状结构,粒径较大(0.1~1 mm),碎裂发育,多呈脉状、稠密浸染状或块状产出,含量变化较大,5%~95%,矿物组合为磁黄铁矿±黄铜矿±闪锌矿±方铅矿±黄铁矿±银金矿,且部分磁黄铁矿可在镜下发现明金矿物(图3d)。此类磁黄铁矿主要发育于气水-热液矿化期的石英-金成矿阶段早期阶段。

砂、板岩和角岩中的磁黄铁矿:多产于远离斑岩体中心的角岩或板岩中。镜下呈古铜色,玫瑰红色,无内反射,未见明显非均质性,他形结构,粒径变化较大(45 μm~1 mm),碎裂发育,集合体呈稀疏浸染状、脉状、网脉状产出,含量10%~50%。这种产状的磁黄铁矿相对矽卡岩中的磁黄铁矿更普遍,矿物组合为磁黄铁矿±石英±黄铁矿±绿泥石±黄铜矿(图3e-i)。此类磁黄铁矿主要发育于气水-热液矿化期的石英-金成矿阶段晚期阶段。

此外,杨阳等(2020)曾通过不同磁黄铁矿的标型矿物学特征研究,揭示产于矿区远端矽卡岩中,

主要为高温六方磁黄铁矿,而产于板岩、角岩中的磁黄铁矿则多为高温六方磁黄铁矿与低温单斜磁黄铁矿的交生体。

4 取样与分析测试

4.1 样品采集与实验方法

本文主要选择产于3种不同产状的磁黄铁矿样品,即矽卡岩中的磁黄铁矿、矽卡岩化角岩和角岩中磁黄铁矿,对其展开LA-ICP-MS微区测点和扫面分析,总共测点23个,分析元素20种;对矽卡岩和角岩中的磁黄铁矿开展LA-ICP-MS扫面分析两个,扫面元素5种。其中,ZK4026、ZK8806、ZK8881分别代表角岩、矽卡岩和矽卡岩化角岩中的磁黄铁矿样品。矽卡岩型矿石样品(ZK8806)采样位置位于矿区南西方向的矽卡岩型矿体中,样品呈块状构造产出,矿石中的磁黄铁矿成稠密浸染状产出,矿物组合几乎全为磁黄铁矿,可见少量黄铜矿、银金矿和铋化物共生(图3g)。矽卡岩化角岩矿石样品(ZK8881)采样位置位于矿区南西方向的矽卡岩矿体中,样品呈条带状产出,矿石中磁黄铁矿呈稠密浸染状、块状产出,可见少量黄铜矿共生(图3e)。角岩型矿石样品(ZK4026)采样位置位于矿区南西方向的角岩型矿体中,样品中磁黄铁矿呈脉状产出,与黄铁矿共生,偶见少量黄铜矿(图3c)。

此次微量元素LA-ICP-MS分析测试工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。首先通过镜下观察,磨制并选择具有代表性的激光片,挑选用于分析的单矿物颗粒并圈定打点位置和扫面位置。激光剥蚀使用配备Coherent Compex-Pro 193 nm ArF准分子激光的ASI RESOLUTION-LR-S155激光微探针进行。使用Agilent 7700x ICP-MS仪器获取离子信号强度。利用氦气(350 mL/min)作为载气。在离开样品池之前,将烧蚀的气雾剂与Ar(900 mL/min)作为传输气体混合。每次单点分析均包含约30 s(气体空白)的背景采集,然后是60 s的样品数据采集。激光剥蚀半径为26 μm ,脉冲频率5 Hz和通量3 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。秘鲁Py作为内标用于校准S和Fe的浓度。通过GSE-1G和GSD-1G校准并转换为亲石元素浓度的累计计数数据。同时,利用STDGL3用于确定亲铜和亲铁元素的浓度(Danyushevsky et al., 2011)。

USGS参考玻璃的元素浓度首选值来自GeoReM数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。此外,将硫化物参考物质MASS-1作为未知样品进行分析,以检查其分析准确性。

4.2 实验结果

4.2.1 LA-ICP-MS测点结果

对矿区角岩、矽卡岩化角岩和矽卡岩3种矿石中的磁黄铁矿展开LA-ICP-MS微区原位测试,测点共计23个,详细结果见表1。分析结果表明,甲玛矿区磁黄铁矿主要富集Co、Ni、Cu、Zn、Ge、Se,弱富集Pb、Bi、Sb、Te、Ag、As,而Mo、Cd、In、Sn、Ba、W、Au、Tl、Th、U等元素含量较低,多位于检测限附近。此外,值得注意的是,矽卡岩和矽卡岩化角岩中的部分磁黄铁矿测点中,分别有4个和1个测点具有较高的Mg、Al、Si、Mn含量值,说明其可能存在显微的铝镁硅酸盐矿物包体。

其中,矽卡岩中的磁黄铁矿Co含量变化为 $16.20\times 10^{-6}\sim 18.89\times 10^{-6}$ (平均值为 17.74×10^{-6}),Ni含量变化为 $10.57\times 10^{-6}\sim 14.71\times 10^{-6}$ (平均值为 12.28×10^{-6}),Zn含量变化为 $6.95\times 10^{-6}\sim 13.72\times 10^{-6}$ (平均值为 10.34×10^{-6}),Ge含量变化为 $7.06\times 10^{-6}\sim 11.41\times 10^{-6}$ (平均值为 8.92×10^{-6}),Se含量变化为 $5.56\times 10^{-6}\sim 23.34\times 10^{-6}$ (平均值为 11.06×10^{-6})(图4)。矽卡岩化角岩中磁黄铁矿Co含量变化为 $22.58\times 10^{-6}\sim 27.01\times 10^{-6}$ (平均值为 23.56×10^{-6}),Ni含量变化为 $45.78\times 10^{-6}\sim 52.53\times 10^{-6}$ (平均值为 49.32×10^{-6}),Zn含量变化为 $1.26\times 10^{-6}\sim 36.30\times 10^{-6}$ (平均值为 12.38×10^{-6}),Ge含量变化为 $8.00\times 10^{-6}\sim 10.52\times 10^{-6}$ (平均值为 9.05×10^{-6}),Se含量变化为 $11.42\times 10^{-6}\sim 23.11\times 10^{-6}$ (平均值为 16.41×10^{-6})。角岩中磁黄铁矿的Co含量变化为 $12.43\times 10^{-6}\sim 16.09\times 10^{-6}$ (平均值为 14.50×10^{-6}),Ni含量变化为 $331.56\times 10^{-6}\sim 426.26\times 10^{-6}$ (平均值为 403.98×10^{-6}),Zn含量变化为 $1.61\times 10^{-6}\sim 3.95\times 10^{-6}$ (平均值为 2.93×10^{-6}),Ge含量变化为 $8.00\times 10^{-6}\sim 10.37\times 10^{-6}$ (平均值为 9.02×10^{-6}),Se含量变化为 $21.91\times 10^{-6}\sim 36.92\times 10^{-6}$ (平均值为 27.64×10^{-6})。

4.2.2 LA-ICP-MS扫面结果

编录和镜下观察发现,矽卡岩矿石中,金含量非常高,同时也发育致密块状的磁黄铁矿。本次对矽卡岩中的磁黄铁矿展开了LA-ICP-MS微区原位扫面测试,LA扫面共计1个,扫面元素34种,用以

表1 甲玛矿区磁黄铁矿微量元素分析结果(10⁻⁶)
Table 1 LA-ICP-MS data of trace element of Pyrrhotite in Jiama deposit (10⁻⁶)

样品	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ge	Se	Cu	Pb	Bi	Sb	Ag	Te	Ga	As	Mo	Sn	Ba	W	Au	
8806-1	7277.98	2745.71	12260.54	45.59	445097.52	17.73	14.27	13.72	11.41	23.34	7.04	18.20	13.73	0.90	0.49	1.49	1.88	3.78	0.35	/	5.56	0.10	/	
8806-2	-	0.47	561.35	0.65	464870.01	18.89	12.63	-	8.51	9.23	2.16	0.37	0.31	0.13	-	0.23	-	0.22	0.14	-	0.01	-	0.02	
8806-3	-	0.85	638.69	0.65	464791.03	18.02	13.44	-	9.34	6.84	0.56	1.41	2.05	-	0.12	0.19	0.04	-	0.07	<0.09	-	0.03	-	
8806-4	7.21	0.70	546.63	-	464881.58	17.01	10.60	-	7.55	6.30	-	2.02	6.91	-	-	-	0.08	-	-	-	0.01	-	-	
8806-5	1607.18	1099.19	4443.71	58.16	458750.74	18.50	11.19	-	7.06	5.56	0.98	15.86	10.18	0.53	-	0.20	-	0.09	-	0.09	-	0.73	0.04	0.11
8806-6	338.49	1111.33	2446.86	96.23	461674.82	18.55	14.71	6.95	11.08	19.38	2.04	3.71	5.19	0.71	0.47	0.89	0.61	0.58	0.31	0.34	0.41	0.16	0.21	
8806-7	17.20	11.06	644.36	14.15	464669.25	16.20	10.57	-	9.33	10.51	-	24.25	113.11	-	0.44	3.04	-	0.51	-	-	0.05	-	0.11	
8806-8	3.44	1.48	569.37	-	464862.58	17.01	10.81	-	7.08	7.34	2.70	1.98	1.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	
最大值	7277.98	2745.71	12260.54	96.23	464881.58	18.89	14.71	13.72	11.41	23.34	7.04	24.25	113.11	0.90	0.49	3.04	1.88	3.78	0.35	0.34	5.56	0.16	0.21	
最小值	3.44	0.47	546.63	0.65	445097.52	16.20	10.57	6.95	7.06	5.56	0.56	0.37	0.31	0.13	0.12	0.19	0.04	0.22	0.07	0.34	0.01	0.01	0.02	
平均值	1541.92	621.35	2763.94	35.91	461199.69	17.74	12.28	10.34	8.92	11.06	2.58	8.48	19.09	0.57	0.38	1.17	0.56	1.27	0.19	0.34	1.13	0.07	0.11	
8881-2	-	-	464.96	3.25	464922.22	25.27	49.08	-	8.67	13.24	2.74	0.07	0.10	-	-	0.20	-	-	0.06	-	-	-	-	
8881-3	20818.37	1207.78	54529.71	1028.45	393277.42	22.58	49.21	36.30	10.52	12.81	4.07	15.87	2.12	0.33	5.47	-	1.09	3.42	0.07	5.11	0.51	0.13	-	
8881-4	-	0.59	514.59	2.74	464872.08	26.00	49.99	1.26	8.31	12.74	0.59	0.25	0.23	-	0.18	0.12	-	-	0.03	-	-	0.02	-	
8881-5	-	0.49	583.39	3.22	464808.99	25.27	45.78	-	8.00	11.42	0.85	0.09	0.10	-	-	0.32	-	0.09	0.01	0.07	-	0.03	-	
8881-6	4.72	1.29	461.43	3.98	464902.56	26.57	51.28	5.42	9.02	23.11	4.04	0.27	0.22	0.61	0.61	0.36	0.05	0.70	0.13	0.24	0.02	0.09	0.10	
8881-7	23.42	41.39	766.80	6.48	464537.81	27.01	52.53	2.84	8.98	20.97	1.44	14.09	6.20	0.72	3.49	0.28	0.06	0.93	0.14	-	0.21	0.05	0.06	
8881-8	3.61	1.11	399.43	2.47	464974.45	25.91	47.66	3.28	9.47	18.83	0.57	4.80	2.38	0.39	1.44	0.20	0.02	0.27	0.17	0.09	0.04	0.06	0.04	
最大值	20818.37	1207.78	54529.71	1028.45	464974.45	27.01	52.53	36.30	10.52	23.11	4.07	15.87	6.20	0.72	5.47	0.36	1.09	3.42	0.17	5.11	0.51	0.13	0.10	
最小值	3.61	0.49	399.43	2.47	393277.42	22.58	45.78	1.26	8.00	11.42	0.57	0.07	0.10	0.33	0.18	0.12	0.02	0.09	0.01	0.07	0.02	0.02	0.04	
平均值	6945.35	307.62	12516.61	231.28	448949.71	25.36	49.32	12.38	9.05	16.41	2.10	5.71	1.96	0.52	2.41	0.25	0.39	1.27	0.09	1.78	0.22	0.07	0.07	
4026-1	-	-	571.32	2.59	464459.77	15.98	422.85	-	8.58	26.72	0.71	0.28	0.25	-	-	-	-	-	0.05	-	0.01	0.02	-	
4026-2	9.41	2.28	718.49	2.18	464305.12	13.99	401.63	3.95	10.37	36.92	5.84	0.36	0.32	0.93	0.58	1.83	0.04	0.39	0.30	0.25	0.08	0.21	-	
4026-3	-	0.87	449.82	1.99	464587.71	14.19	411.06	1.61	9.22	23.42	2.06	0.40	0.27	-	0.21	0.44	0.04	0.21	0.14	0.53	-	0.04	0.08	
4026-4	-	0.71	387.23	1.89	464649.90	16.09	412.29	-	8.83	23.86	1.40	0.26	0.14	0.30	0.30	0.64	0.04	0.29	0.06	0.14	-	0.07	-	
4026-5	5.61	10.34	475.54	1.25	464545.41	15.07	411.67	3.24	8.00	30.44	0.43	1.22	0.59	0.25	0.59	0.76	0.07	0.35	0.13	0.14	0.14	0.07	-	
4026-6	2.58	1.25	348.54	2.22	464677.27	13.88	414.51	3.32	8.47	35.88	2.76	0.24	0.19	0.29	0.24	0.83	0.06	0.21	0.14	0.09	0.01	0.16	-	
4026-7	-	0.60	357.62	1.93	464665.81	12.43	426.26	2.71	10.21	21.91	1.63	0.64	0.34	-	0.21	0.78	0.05	0.18	0.19	0.10	0.02	0.07	-	
4026-8	-	0.80	252.60	1.00	464860.97	14.39	331.56	2.72	8.48	21.97	0.32	2.65	1.98	0.25	0.97	0.46	0.02	0.31	0.16	-	-	0.07	-	
最大值	9.41	10.34	718.49	2.59	464860.97	16.09	426.26	3.95	10.37	36.92	5.84	2.65	1.98	0.93	0.97	1.83	0.07	0.39	0.30	0.53	0.14	0.21	0.08	
最小值	2.58	0.60	252.60	1.00	464305.12	12.43	331.56	1.61	8.00	21.91	0.32	0.24	0.14	0.25	0.21	0.44	0.02	0.18	0.05	0.09	0.01	0.02	0.08	
平均值	5.87	2.41	445.15	1.88	464594.00	14.50	403.98	2.93	9.02	27.64	1.89	0.76	0.51	0.40	0.44	0.82	0.05	0.28	0.15	0.21	0.05	0.09	0.08	

注:8806为矽卡岩,8881为矽卡岩化角闪岩,4026为角闪岩,测试单位为:中国科学院地球化学研究所;测试指导老师:戴智慧。微量元素检测限(10⁻⁶):Mg 2.26,Al 0.71,Si 211.11,Mn 0.39,Fe 24.13,Co 0.03,Ni 0.07,Zn 1.57,Ge 0.71,Se 0.91,Cu 0.35,Pb 0.04,Bi 0.02,Sb 0.26,Ag 0.13,Te 0.14,Ga 0.01,As 0.11,Mo 0.01,Sn 0.08,Ba 0.01,W 0.01,Au 0.04。

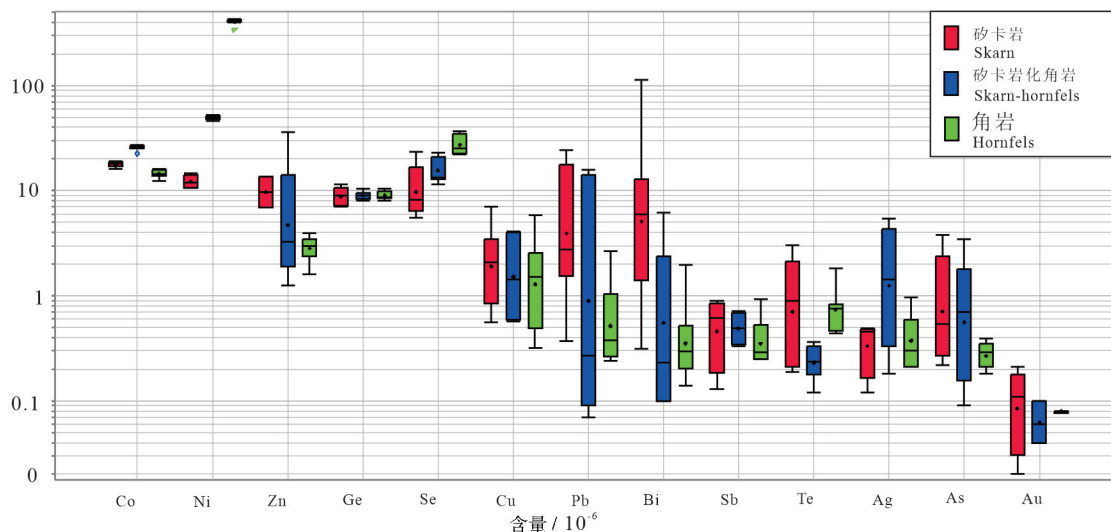


图4 甲玛矿床不同产状磁黄铁矿的微量元素特征

Fig.4 Trace element characteristics of different types pyrrhotite in Jiama deposit

揭示磁黄铁矿与金矿化的耦合关系,详细的扫描结果见图5。

5 讨论

5.1 磁黄铁矿微量元素地球化学特征

研究表明,Co、Ni在黄铁矿、磁黄铁矿中,主要以类质同象的形式置换Fe,同时,Co、Ni的含量变化也主要受矿物沉淀时的物理化学条件控制,因此不

同成因类型的黄铁矿、磁黄铁矿通常具有不同的Co、Ni含量和比值(Loftus-Hills et al., 1967; Bralial et al., 1979)。前人通过对不同类型铜矿床磁黄铁矿的地球化学统计,绘制了Co-Ni含量地球化学图,用以印证磁黄铁矿的成因(陈殿芳等,1995;冷成彪,2017)。其中,火山成因(VMS)的黄铁矿Co/Ni比值一般介于5~100,而磁黄铁矿Co/Ni比值变化较大,但一般大于1(冷成彪,2017)。

根据上述LA-ICP-MS测点结果,3种磁黄铁矿样品中均富含较高的Co和Ni。同时,测点分析的元素谱线图上显示,Co和Ni的含量变化稳定,无明显的陡峰,说明Co、Ni主要以类质同象的形式产于磁黄铁矿的晶格中。分析结果表明,不同产状磁黄铁矿中Co的含量变化不大,多介于 12.43×10^{-6} ~ 27.01×10^{-6} ,且矽卡岩化角岩中磁黄铁矿Co含量最高。Ni的含量则变化较大,角岩中磁黄铁矿Ni含量明显高于矽卡岩化角岩和矽卡岩中的磁黄铁矿。根据甲玛矿区不同产状磁黄铁矿的原位分析结果,角岩中磁黄铁矿Co/Ni比值较低,均落入沉积型区域,暗示角岩中磁黄铁矿可能一定程度地继承了沉积过程中Co、Ni含量特征(图5)。而矽卡岩中磁黄铁矿Co/Ni比值较高,与云南红山斑岩矽卡岩成因区域以及广东大宝山矽卡岩成因区域(冷成彪,2017;刘武生等,2019)相重合,说明其主要为热液接触交代过程中形成的产物。而矽卡岩化角岩中

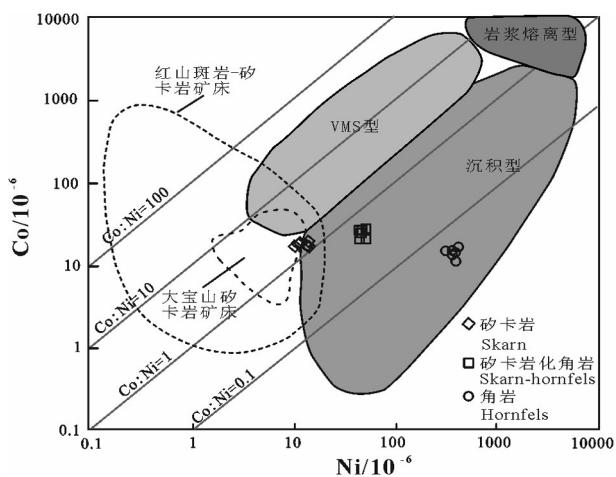


图5 甲玛矿床磁黄铁矿Co-Ni协变图(据冷成彪,2017;刘武生等,2019)

Fig.5 Binary plots of Co vs. Ni pyrrhotite from Jiama deposit (after Leng Chengbiao et al., 2017; Liu Wusheng et al., 2019)

磁黄铁矿则主要介于二者之间,属于过渡的产物。其中,矽卡岩中Co/Ni比值升高,是因为斑岩成矿系统的深部岩浆氧化过程中,Ni会优先进入八面体比例较高的早期结晶矿物中(如橄榄石、斜方辉石),而Co则主要在岩浆演化晚期的矿物中富集,所以导致岩浆热液流体本身出现Co/Ni值大于1的现象。而矽卡岩属于岩浆热液与碳酸盐岩地层接触交代的产物,其成矿流体主要来源于岩浆热液,所以,矽卡岩中结晶的磁黄铁矿呈现较高的Co/Ni比值(冷成彪,2017)。

同时,矽卡岩和矽卡岩化角岩中磁黄铁矿均具有较高含量的Zn和中等含量的Pb。明显高于角岩中磁黄铁矿的Zn和Pb含量。这主要与甲玛矿区主要成矿元素的空间分布规律有关。本次研究样品中,矽卡岩、矽卡岩化角岩样品均主要采自南坑矿段。而南坑矿段的矽卡岩矿化主要为Cu、Pb、Zn,即矽卡岩中发育大量浸染状、稠密浸染状、块状黄铜矿、方铅矿、闪锌矿的矿物组合。其Pb、Zn的矿化主要受控于岩浆热液演化外围远端,在与大理岩的接触带附近或者大理岩溶洞中形成块状或manto型矿体(Meinert, 2005; 唐攀等, 2017; 张忠坤等, 2020)。所以,本次矽卡岩和矽卡岩化角岩中磁黄铁矿的较高的Zn、Pb含量是来源于主成矿流体金属元素的演化末期出溶沉淀的产物。此外,从LA测点样品的元素分析谱可以看出,Zn、Pb只在局部呈陡波峰的形式产出,说明其可能并不是均匀的产于磁黄铁矿晶格中,而是以显微包体的形式产出(图6)。所以,Zn、Pb的富集说明其可能存在细粒的显微闪锌矿和方铅矿包体。

其次,3种产状的磁黄铁矿中均具有较高的Ge含量,且含量稳定,差异不大,说明Ge并不严格受岩石类型控制。通常,在气成-热液作用中,Ge一般很少存在。但矽卡岩矿床中,Ge可常见于石榴子石、电气石等矿物中。尤其在富含铜的矽卡岩矿床中,可见少量的Ge呈杂质产于硫化物中,但这类含Ge的硫化物多为热液作用演化晚期的产物(刘英俊等,1984)。甲玛作为典型的富铜矽卡岩矿床,矿床内应该富含一定量的Ge。此次采集的磁黄铁矿样品均为甲玛矿区晚期成矿作用的样品,所以,磁黄铁矿中的Ge主要为矽卡岩成矿作用过程中热液演化晚期的产物。

Se、Te在自然界中很多地球化学特征相似,通常作为一个元素地球化学对来讨论(赵振华,1997)。甲玛矿区,3类磁黄铁矿中,均富含一定的Se,以及少量的Te。在热液成矿作用过程中,Se与硫的元素各项化学参数相似,可以广泛地进入硫化物晶格中,以类质同象的形式置换硫。Te则尽可以进入硫化物中,也可以形成独立的Te矿物,如碲金矿、碲铋矿等。尽管Se、Te可以在热液成矿作用中发生一定程度的富集,二者也都集中产于热液晚期的硫化物阶段。因此,甲玛不同产状的磁黄铁矿中的Se、Te可能是热液成矿晚期的产物。

Bi也是磁黄铁矿中较为富集的元素之一,尤其是产于矽卡岩的磁黄铁矿样品中,Bi含量变化较大,主要介于 $0.31 \times 10^{-6} \sim 113.11 \times 10^{-6}$ (平均值为 19.09×10^{-6})。研究表明,方铅矿常含铋,是热液中铋的一个非常重要的载体矿物。同时,元素地球化学性质表明,Bi可以呈 Bi^{3+} 价与 Ag^{1+} 一起置换 Pb^{2+} ,即 $\text{Bi}^{3+} \text{Ag}^{1+} \rightarrow 2\text{Pb}^{2+}$ (刘英俊等,1984)。此外,铋也可能以显微包体的形式包含在方铅矿中,实际矿物为辉铋矿,亦或是更为复杂的银铋铊铜矿、辉碲铋矿、硫银铋矿等。同时,从测点元素谱线图(图6)可以看出,Bi主要呈陡波峰的形式产出,说明其主要为矿物包体。同时,Bi的波峰与Pb的波峰明显对应,也说明铋的富集与Pb的富集有关,可能是类质同象的形式产于方铅矿中。此外,测点分析中,3类磁黄铁矿中Bi与Pb均呈现明显的正相关关系(图7)。

此外,磁黄铁矿中还弱富集一些Sb、As、Ag、Au等低温元素,也说明其主要位于成矿热液中心的远端。

5.2 磁黄铁矿与金矿化的耦合关系

金作为甲玛矿区最为重要的金属矿化之一,也是甲玛区别其他斑岩成矿系统的重要标志。最新勘查成果表明,甲玛矿区金资源量已经超过240 t(林彬等,2019)。其中,金主要以低品位伴生的形式产于矽卡岩的铜多金属矿体中,这类金矿化与铜矿化密切相关,尤其是与高品位的黄铜矿和斑铜矿呈明显正相关关系,即铜品位越高(大于0.6%或1.0%),伴生金品位越高,局部金可达0.3~0.8 g/t。此外,还有少量的金以高品位、脉状独立产出。这类脉状金矿体多产于甲玛矿区的远端或外围,既可以产于大理岩和矽卡岩中,也可以产于砂板岩、角岩或者闪长玢岩中。其中,Au与铜矿化的耦合关

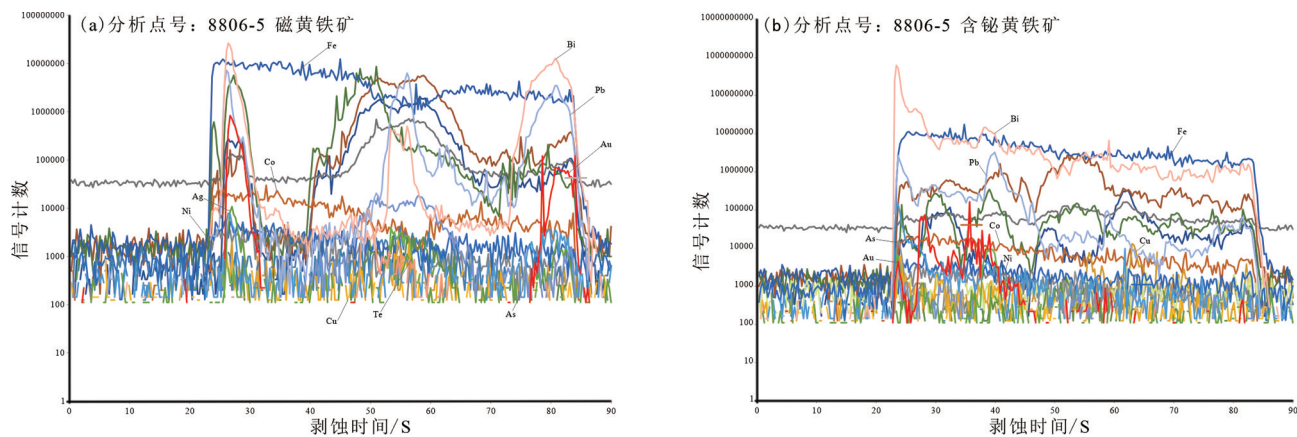


图6 甲玛矿床磁黄铁矿 LA-ICP-MS 元素谱线图
Fig.6 Single-spot LA-ICP-MS spectra for selected elements in pyrrhotite from the Jiama deposit

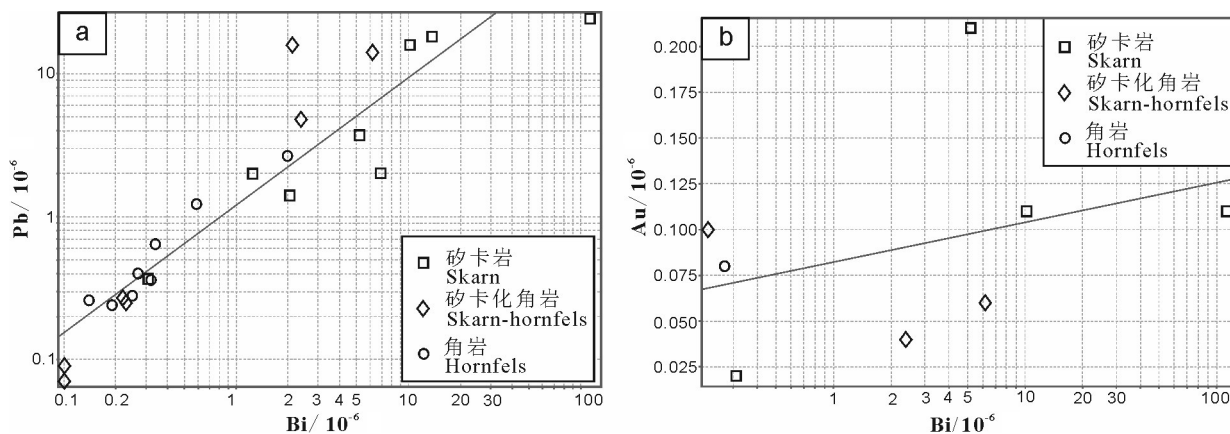


图7 甲玛矿床磁黄铁矿 Bi-Pb 和 Bi-Au 关系图
Fig.7 Bi vs. Pb and Bi vs. Au diagrams of pyrrhotite in Jiama deposit (legend same as Fig.4)

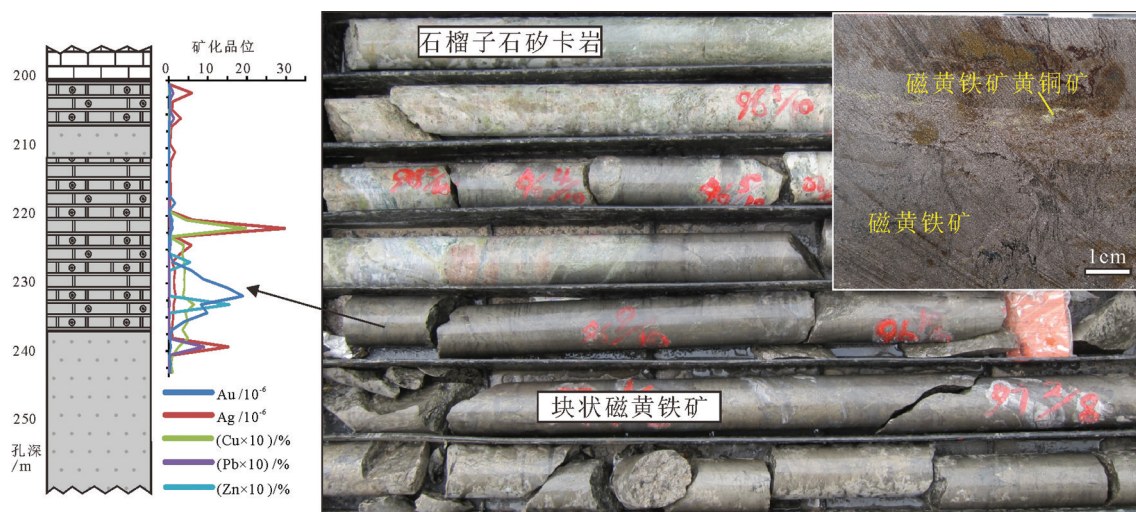


图8 甲玛矿床 ZK8806 含 Au 磁黄铁矿手标本和柱状图
Fig.8 Hand specimen and column diagram of Au bearing pyrrhotite in Jiama deposit

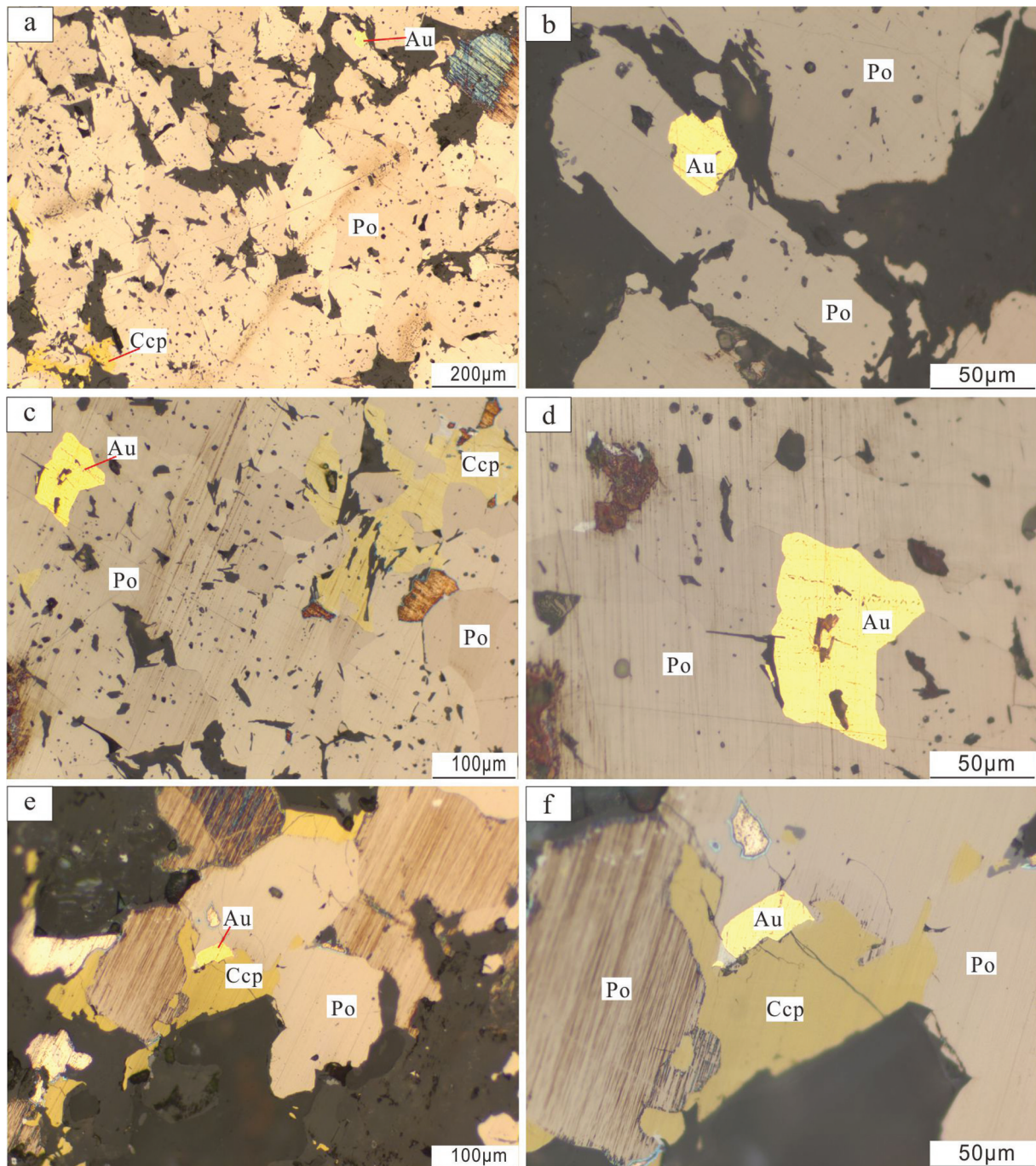


图9 甲玛矿床含金磁黄铁矿显微照片

a—矽卡岩中产出的磁黄铁矿显微照片;b—矽卡岩中产出的连生金;c—矽卡岩中产出的含包裹金的磁黄铁矿显微照片;d—矽卡岩中产出的含包裹金的磁黄铁矿显微照片;e—矽卡岩中产出的含粒间金的磁黄铁矿显微照片;f—矽卡岩中产出的含粒间金的磁黄铁矿显微照片;Po—磁黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Au—含金矿物

Fig.9 Micrographs of gold-bearing pyrrhotite in Jiama deposit

a—Micrograph of pyrrhotite produced in skarn;b—Associated gold in skarn; c—Micrograph of pyrrhotite with gold inclusions in skarn;d—Micrograph of pyrrhotite with gold inclusions in skarn;e—Micrograph of pyrrhotite with intergranular gold in skarn;f—Micrograph of pyrrhotite with intergranular gold in skarn;Po—Pyrrhotite;Ccp—Chalcopyrite;Au—Au-bearing mineral

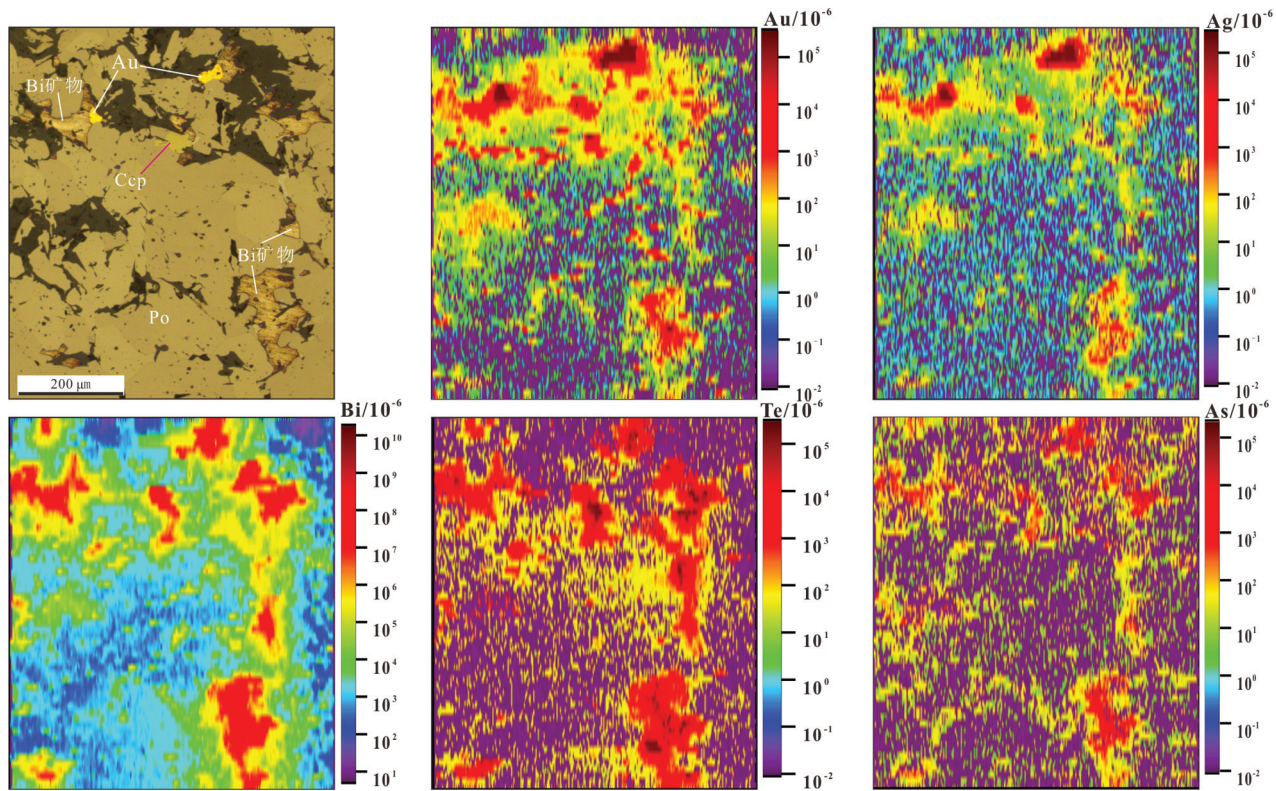


图10 甲玛矿床含金磁黄铁矿扫描面分析结果图

Fig.10 Results of mapping analysis of gold-bearing pyrrhotite in Jiama deposit

系,前人已经做了比较详细的总结和探究(郑文宝等,2012)。本次主要研究产于矿区外围或远端的高品位脉状金矿,并探究这类金矿化与磁黄铁矿的耦合关系。

钻孔 8806 位于甲玛矿区南坑矿段,该钻孔中发育高品位的脉状金矿体。其中,金矿化品位多介于 0.48~8.89 g/t,最高可达 19.00 g/t,同时,该矿体中有发育中等的铜矿化(0.34%~0.64%,局部 1 个样为 1.97%),主要为细粒浸染状的黄铜矿,多产于矽卡岩矿物中,少量产于块状磁黄铁矿中。此外,局部还存在少量 Ag、Pb、Zn 矿化信息,其中,Ag 矿化与 Pb 矿化密切相关,可能揭示银主要赋存于方铅矿中。值得注意的是,该脉状金矿体,并不与铜矿化直接相关,即金的矿化强度与铜矿化强度无关。钻孔编录发现金矿化最高的地段,主要形成块状的磁黄铁矿以及少量的黄铜矿(图 8)。

为进一步揭示磁黄铁矿与金矿化的耦合关系,本次对 ZK8806 中矽卡岩中出现的块状磁黄铁矿进行了 LA 测点分析,结果发现,有 3 个测点检测到了

Au 的矿化信息(表 1),介于 $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.21 \times 10^{-6}$ (表 1)。进一步查验元素谱线图,发现 Au 的峰值主要呈局部陡波峰的形式出现,并不呈现稳定曲线,可以初步判定磁黄铁矿的金矿化主要呈显微包体的形式存在。

同时,详细的镜下鉴定中,也发现大量的细粒金矿物颗粒,这类含金矿物主要呈他形、不规则状包裹于磁黄铁矿中亦或是产于磁黄铁矿与黄铜矿颗粒间(图 9)。为进一步揭示磁黄铁矿与含金矿物的空间分布规律,本次对块状磁黄铁矿进行 LA 扫描分析。扫描分析结果(图 10)显示,含金矿物主要呈他形粒状产于磁黄铁矿的粒间,同时,含金矿物中富含高品位的 Ag 矿化,推测含金矿物可能为银金矿。此外,在 Bi、Te、As 等元素的扫描中,3 种元素呈现密切的相关性,镜下显示该矿物可能为碲铋矿。

通过上述研究表明,甲玛矿区独立的高品位脉状金矿化可以产于远端的矽卡岩中,这类金矿化主要呈自然金或银金矿,呈他形、不规则状产于块状

的磁黄铁矿中。这类金矿化强度与铜矿化并无直接联系。相反,这类金矿化可能与含Bi、Se、Te的矿物有关。LA测点结果显示,矽卡岩中的块状磁黄铁矿,铋的含量与金的含量呈弱正相关(图7)。此外,LA扫描结果也显示,这类金矿化可能与含铋矿物(可能为碲铋矿)紧密共生。已有研究表明,金矿化与铋矿物在成因上常具有密切联系(Zhou et al., 2017)。自然铋或含铋矿物,熔点较低(271℃),当流体温度高于其熔点时,铋呈熔融态存在于流体中,并持续吸附捕获流体中的Au,形成铋-金熔体,当流体温度降低至铋熔点以下时,铋-金熔体出熔结晶形成金-铋矿化(Blake et al., 2009)。

基于以上证据,本文认为矽卡岩中块状磁黄铁矿中的Au矿化可能与含铋熔体捕获机制有关,即当成矿热液流体温度在271℃以上时,流体中的铋不断捕获流体中的Au元素,形成铋-金熔体。当流体温度降低至271℃~254℃时,铋金熔体出熔,形成自然金、自然铋/含铋硫化物,并包裹于磁黄铁矿中或粒间,从而形成与块状磁黄铁矿密切相关的金矿化。

6 结 论

(1)甲玛矿床磁黄铁矿主要富集Co、Ni、Cu、Zn、Ge、Se,弱富集Pb、Bi、Sb、Te、Ag、As,而Mo、Cd、In、Sn、Ba、W、Au、Tl、Th、U等元素含量较低。

(2)矽卡岩中的磁黄铁矿具有较高的Co/Ni比值,能有效揭示其岩浆热液成因,而角岩中磁黄铁矿可能继承了一定的沉积特征。磁黄铁矿的Cu、Zn、Pb含量变化特征与矿床空间矿化规律一致。

(3)矽卡岩中的块状磁黄铁矿与金矿化关系密切,金主要呈他形、不规则的独立金矿物产于磁黄铁矿的孔隙和粒间。同时,金的富集和沉淀可能与富铋的熔体有关。

致谢:感谢中国21世纪议程管理中心、中国黄金集团、西藏华泰龙矿业开发有限公司等单位以及项目执行过程中诸多专家对项目野外工作的指导和支持。感谢匿名审稿专家提出的宝贵审改意见。

References

Belousov I, Large R R, Meffre S, Danyushevsky L V, Steadman J, Beardsmore T. 2016. Pyrite compositions from vms and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications

for gold and copper exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 79: 474–499.

Blake A Tooth, Joël Brugger, Cristiana L. Ciobanu. 2009. Experimental observation of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101 (1): 104–104.

Bralia A, Sabatinig, Troja F. 1979. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353–374.

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. 1987. *Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy*[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(in Chinese).

Danyushevsky L, Robinson P, Gilbert S, Norman M, Large R, McGoldrick P, Shelley M. 2011. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development, consideration of matrix effects[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 11(1): 51–60.

Guo Wenbo, Zheng Wenbao, Tang Juxing, Ying Lijuan, Wang Yiyun, Lin Bin. 2014. Geochemical constraints on the source of metallogenic fluids and materials in the Jiama polymetallic Cu deposit, Tibet[J]. *Geology in China*, 41(2): 510–528 (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, 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 Bin, Tang Juxing, Tang Pan, Zhou Aorigele, Sun Miao, Qi Jing, Chen Guoliang, Zheng Wenbao, Zhang Zhongkun, Zhang Zebin, Wu Chunheng, Tian Zhichao, Dai Jingjing, Yang Zhenkun, Yao Xiaofeng. 2021. Preliminary study of the first 3000 m scientific drilling in the Jiama porphyry metallogenic system, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 40(6): 1119–1134 (in Chinese with English abstract).

Lin Bin, Tang Juxing, Chen Yuchuan, Song Yang, Hall Greg, Wang Qin, Yang Chao, Fang Xiang, Duan Jilin, Yang Huanhuan, Liu Zhibo, Wang Yiyun, Feng Jun. 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: 1–21.

Lin Bin, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Wang Qin, Song Yang, Yang Chao, Wang Wenlei, He Wen, Zhang Lejun. 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: 602–616.
- Lin, Bin, Tang Juxing, Chen Yuchuan, Baker Micheal, Song Yang, Yang Huanhuan, Wang Qin, He Wen, Liu Zhibo. 2019. Geology and geochronology of Naruo large porphyry–breccia Cu deposit in the Duolong district, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 66: 168–182.
- Leng Qiufeng, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Lin Bin, Wang Yiyun, Tang Pan, Lin Xin. 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 Chengbiao. 2017. Genesis of Hongshan Cu polymetallic large deposit in the Zhongdian area, NW Yunnan: Constraints from LA–ICPMS trace elements of pyrite and pyrrhotite[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(6):162–175(in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Ruyi, Zhang Xiong, Jiang Jinchang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Ying Lijuan, Liu Zhanqin. 2019. The EPMA and LA–ICP–MS In–situ geochemical features of pyrrhotite and pyrite in Dabaoshan Cu–polymetallic deposit, North Guangdong Province, and their constraint on genetic mechanism[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 40(2):291–306(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef Günther, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 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: 34–43.
- Large R R, Maslennikov V, Roboert F, Danyushevsky L V, Chang Z. 2007. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant sukhoi log deposit, Lena gold province, Russia[J]. *Economic Geology*, 102(7): 1233–1267.
- Loftus–Hills G, Solomon M. 1967. Cobalt, Nickel and selenium in sulphides as indicators of ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2(3): 228–242.
- Liu Yinjun, Cao Liming. 1984. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Qin Zhipeng. 2013. Genetic Model of Jiama Copper Polymetallic Deposit in Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, Zhong Kanghui, Ying Lijuan, Zheng Wenbao, Li Fengji, Guo Na, Qin Zhipeng, Yao Xiaofeng, Li Lei, Wang You and 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 and 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, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Ying Lijuan and Qin Zhipeng. 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 Juxing, Wang Qin. 2019. Advantages of copper resources and prospects for their exploitation and utilization in Tibet[J]. *China Engineering Science*, 21(1):140–147(in Chinese with English abstract).
- Wang Yiyun, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Leng Qiufeng, Tang Pan, Ding Shuai and 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).
- Wang Huan, Wang Liqiang, Ying Lijuan, Zheng Wenbao. 2011. Features and genesis of bornite in Jiama copper–polymetallic deposit of Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 305–317(in Chinese with English abstract).
- Ye Tian, Li Nuo. 2015. The application of pyrite LA–ICP–MS trace element analysis to gold deposits[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(4): 1178–1199(in Chinese with English abstract).
- Yang Yang, Tang Juxing, Wu Chunheng, Lin Bin, Tang Pan, Zhang Zhebing, He Liang, Qi Jing, Li Yixuan. 2020. Typomorphic mineralogical characteristics of pyrrhotite in Jiama Cu polymetallic deposit, Tibet, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 39(2):337–350(in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, Chang Zhesheng, Qu Wenjun, Zheng Wenbao and Wang Huan. 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).
- Zheng Wenbao, Tang Juxing, Chang Zhesheng, Li Fengji, Yao Xiaofeng. 2010. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Jiama polymetallic copper deposit in Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 46(6): 985–994(in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenbao. 2012. The Study on Metallogenic Model and Prospecting Pattern for Jiama Polymetallic Copper Deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenbao, Tang Juxing, Zhong Kanghui. 2016. Geology of the Jiama Porphyry copper–polymetallic system, Lhasa Region, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 74: 151–169.
- Zhao Zhenhua. 1997. *Principles of Trace Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1–218(in Chinese).
- Zhang Zhongkun, Lin Bin, Chen Guoliang, Zou Bing, Yang Zhongkun, Tang Pan, Gao Xin, Gao Futai, Jiao Haijun, Sun Jianjun, Li Yajun, Su Wei. 2020. The relationship of diagenesis, mineralization and

- structural of south-pit skarn thick ore-body in Jiama Cu-Mo super-large deposit, Tibet[J]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200702.0858.002.html>.
- Zhong Kanghui, Li Lei, Zhou Huiwen, Bai Jinguo, Li Wei, Zhong Wanting, Zhang Yongqiang, Lin Jiqin, 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 Haoyang, Sun Xiaoming, Nigel J. Cook, Lin Hai, Fu Yu, Richen Zhong and Joel Brugger. 2017. Nano-to micron-scale particulate gold hosted by magnetite: A product of gold scavenging by bismuth melts[J]. *Economic Geology*, 112: 993-1010.
- Zhou Yun. 2010. Characteristics and Evolution of Metallogenic Fluids in Jiama Copper Polymetallic Deposit, Mozhugongka County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Zou Bin, Lin Bin, Zheng Wenbao, Song Yang, Tang Pan, Zhang Zebing, 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
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学及找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 郭文铂, 郑文宝, 唐菊兴, 应立娟, 王艺云, 林彬. 2014. 西藏甲玛铜多金属矿床流体、成矿物质来源的地球化学约束[J]. *中国地质*, 41(2): 510-528.
- 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, 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(6): 1204-1222.
- 林彬, 唐菊兴, 唐攀, 周放日格勒, 孙渺, 祁婧, 陈国良, 张忠坤, 张泽斌, 吴纯能, 田志超, 代晶晶, 杨征坤, 姚晓峰. 2021. 青藏高原甲玛斑岩成矿系统首例3000 m科学深钻的初步认识[J]. *矿床地质*, 40(6): 1119-1134.
- 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砂卡岩矿体控矿因素研究[J]. *矿床地质*, 34(2): 273-288.
- 冷成彪. 2017. 滇西北红山铜多金属矿床的成因类型: 黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICPMS 微量元素制约[J]. *地学前缘*, 24(6): 162-175.
- 刘武生, 赵如意, 张熊, 蒋金昌, 陈毓川, 王登红, 应立娟, 刘战庆. 2019. 粤北大宝山铜多金属矿区黄铁矿与磁黄铁矿 EPMA 和 LA-ICP-MS 原位微区组分特征及其对矿床成因机制约束[J]. *地球学报*, 40(2): 291-306.
- 刘英俊, 曹励明. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 秦志鹏. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床成因模式[D]. 成都: 成都理工大学.
- 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, 黎枫信, 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, 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, 王勤. 2019. 西藏铜矿资源优势及开发利用展望[J]. *中国工程科学*, 21(1): 140-147.
- 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铅元素分离机制探讨[J]. *岩石学报*, 33(2): 495-514.
- 王焕, 王立强, 应立娟, 郑文宝. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床斑岩矿特征及其成因意义[J]. *矿床地质*, 30(2): 305-517.
- 叶甜, 李诺. 2015. 黄铁矿原位 LA-ICP-MS 微量元素分析在金矿床中应用[J]. *地质科学*, 50(4): 1178-1199.
- 杨阳, 唐菊兴, 吴纯能, 林彬, 唐攀, 张泽斌, 何亮, 祁婧, 李怡萱. 2020. 西藏甲玛铜多金属矿床磁黄铁矿标型矿物学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 39(2): 337-350.
- 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钨矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. *地质学报*, 84(8): 1165-1174.
- 郑文宝, 唐菊兴, 畅哲生, 黎枫信, 姚晓峰. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质地球化学特征及成因浅析[J]. *地质与勘探*, 46(6): 985-994.
- 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(S1): 181-196.
- 郑文宝. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿模式与找矿模型[D]. 成都: 成都理工大学.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1-218.
- 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—卡果果推—滑覆构造系特征[J]. *地球学报*, 33(4): 411-423.
- 张忠坤, 林彬, 陈国良, 邹兵, 杨征坤, 唐攀, 高昕, 高福太, 焦海军, 孙建军, 李亚军, 苏伟. 2020. 西藏甲玛超大型 Cu-Mo 矿床南坑厚大砂卡岩矿体的成岩-成矿-构造耦合关系[J]. *中国地质*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200702.0858.002.html>.
- 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[D]. 成都: 成都理工大学.
- 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.