

西藏甲玛斑岩矿床系统黑云母特征及其地质意义^{*}

唐攀¹, 陈毓川², 唐菊兴^{2* * *}, 郑文宝^{2,3}, 冷秋锋¹, 林彬², 方向²

(1 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 甲玛矿床位于西藏冈底斯成矿带东段, 是公益性研究与商业性勘查结合取得的重要成果。文章以不同产状黑云母为研究对象, 采用岩、矿石光薄片显微鉴定、电子探针分析等系统研究矿区黑云母特征。黑云母的成因类型可分为原生黑云母和热液黑云母, 原生黑云母和热液黑云母落于黑云母分类图中富镁黑云母和金云母区域, 岩体中的黑云母偏向于富镁黑云母, 具有富镁特征。与原生黑云母相比, 角岩中的热液黑云母具有 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CuO})$ 升高, $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 降低, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 分异程度增大的特征; 岩体中的热液黑云母 $w(\text{TiO}_2)$ 小于3%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 大于15%, 具有低钛、高铝的特征, $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CuO})$ 升高, $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 降低的特点。花岗斑岩中原生黑云母的结晶温度变化在730~750℃, $\log f(\text{O}_2)$ 较高(变化范围-13.0~-11.5, $\log f(\text{O}_2) > \text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$), 属于造山带钙碱性岩系, 具壳幔混源的成因特点。与原生黑云母相比, 角岩中热液黑云母 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值均一程度低, 且 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值显著升高, 甚至部分热液黑云母不含 Fe^{2+} , 指示岩浆-热液流体体系逐渐向氧化态过渡, 有利于斑岩铜矿的形成。对于热液黑云母所在的岩矿石样品, 矿化作用的强度与黑云母的CuO呈正相关, 对成矿具有一定的指示意义。

关键词 地球化学; 黑云母; 斑岩成矿系统; 角岩; 甲玛铜多金属矿; 西藏

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Characteristics and geological significance of biotites in Jiama porphyry deposit system, Tibet

TANG Pan¹, CHEN YuChuan², TANG JuXing², ZHENG WenBao^{2,3}, LENG QiuFeng¹,
LIN Bin² and FANG Xiang²

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Jiama deposit, located in the eastern Gangdise metallogenic belt of Tibet, has been the important achievement of the combination of nonprofit study with commercial prospecting. In this paper, the authors systematic studied characteristics and geological significance of biotites by using the microscopic identification and electron microprobe analysis. The biotite can be divided into two sorts: protogenic biotite and hydrothermal biotite. Progenic biotite and hydrothermal biotite belong to eastonite and phlogopite, and biotite in rock mass tends to be eastonite with rich magnesium features. Compared with protogenic biotite, the values of $w(\text{MgO})$

^{*} 本文得到“地质大调查项目(编号: 12120114050501)、自然科学基金项目(编号: 41302060)、国家973项目(编号: 2011CB403103)和地质大调查项目(编号: 12120113093700)”共同资助

第一作者简介 唐攀, 男, 1989年生, 博士研究生, 主要从事矿床勘查与评价工作。Email: tangpan168@163.com

^{**} 通讯作者 唐菊兴, 男, 1964年生, 博士生导师, 研究员, 主要从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究工作。Email: tangjuxing@126.com

收稿日期 2015-07-11; 改回日期 2016-04-15。秦思婷编辑。

and $w(\text{CuO})$ increase, Fe^{3+} - Fe^{2+} differentiation degree increases, and $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ decreases in hydrothermal biotite of hornfels. In rock mass, compared with protogenic biotite, hydrothermal biotite seems to have characteristics of low titanium, high aluminum ($\text{TiO}_2 < 3\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$), the values of Mg and Cu increase, and Fe decreases. The crystallization temperature (T) of the protogenic biotites is $720 \sim 750^\circ\text{C}$, and oxygen fugacity ($\log f(\text{O}_2)$) of the protogenic biotites is high ($-13.0 \sim -11.5$, $\log f(\text{O}_2) > \text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$) in granite porphyry. Granite porphyry, with the genetic characteristics of crust-mantle mixed source, belongs to orogenic calc-alkaline rock series. In hornfels, compared with protogenic biotite, the ratio of $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ from hydrothermal biotite is of low homogeneous degree, and the ratio of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ increases significantly, with some hydrothermal biotite containing no Fe^{2+} , indicating that the magmatic hydrothermal fluid system gradually transformed to oxidation state, which was conducive to the formation of porphyry copper deposit. Mineralization intensity is positively related to the content of CuO in biotite.

Key words: geochemistry, biotite, porphyry metallogenic system, hornfel, Jiama copper polymetallic deposit, Tibet

黑云母, 三八面体, 分子式一般为 $(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba})(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Ti}^{4+}, \text{Mn}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$, 是长英质岩岩中最常见的含水的镁铁质成岩硅酸盐矿物, 既可以形成于侵入体结晶过程, 也可以形成于岩浆热液蚀变过程 (Jacobs et al., 1976; 1979)。侵入体中的黑云母成因类型分为岩浆黑云母和热液黑云母 (杨敏之, 1964; Jacobs et al., 1976; 1979; 王崴平等, 2012)。黑云母的结构和化学成分对岩浆或岩浆热液的物理化学条件 (温度、压力、氧逸度、成分) 十分敏感, 热动力条件的变化可以控制黑云母的化学成分。因此, 黑云母的化学成分可以有效地指示岩浆热液系统的物化条件 (Wones et al., 1965; Czamanske et al., 1973; Speer, 1987)。前人对黑云母的研究多以花岗岩类岩体为对象展开, 指出其在推测母岩岩浆起源、成岩过程、成岩物理化学条件、后期热液作用、钾化蚀变与流体演化关系及成矿元素富集等方面均具有重要的指示意义 (Wones et al., 1965; Beane et al., 1974; Jacobs et al., 1979; 梁祥济等, 1995; 蒋少涌等, 1992)。斑岩矿床或花岗岩相关矿床侵入岩体中黑云母的含矿元素 (特别是 Cu) 可以区分矿化与非矿化岩体, 对成矿具有一定的指示作用; 黑云母是斑岩铜矿及其他热液铜矿找矿矿物学、成因矿物学的一种重要指示矿物 (Parry et al., 1963; Al-Hashimi et al., 1970; 傅金宝, 1981; 洪大卫, 1982; Cook, 1988; 柳少波等, 1995; 熊小林等, 2001; Yavuz, 2003a; 2003b; 李鸿莉等, 2007; 秦克章等, 2009; 刘彬等, 2010)。但前人的研究对热变质岩角岩 (后又叠加热液蚀变) 中黑云母的关注不多, 以致不能建

立一个统一的斑岩成矿系统中黑云母的矿物化学规律。因此, 不同产出状态的黑云母的研究, 对于斑岩矿床成矿系统的构建具有重要的指示意义。

甲玛超大型铜多金属矿属于斑岩成矿系统, 位于冈底斯成矿带东段, 探明铜、钼、铅、锌、金、银资源量均达大型以上规模。该矿床发现于 20 世纪 50 年代, 西藏地质六队于 90 年代开始勘查评价, 探矿范围局限于矿体出露与浅地表的铅山至铜山 2.159 km^2 范围内。早期部分学者根据浅部工程揭露的层状、似层状矽卡岩型铅锌 (铜) 矿体, 加上矿石中可见到条带状构造等特征, 认为该矿床成因类型属于海底喷流沉积 (SEDEX) (杜光树等, 1998; 姚鹏等, 2002; 潘凤雏等, 2002; 王全海等, 2002; 李金高等, 2001); 还有一些学者认为矿床类型为斑岩-矽卡岩型 (曲晓明等, 2001; 侯增谦等, 2001; 连玉等, 2008)。2008 年开始, 项目组在前人工作基础上对甲玛矿区进行了详细的地质勘探和研究工作, 对矿床的地质特征 (唐菊兴等, 2010; 郑文宝等, 2010; 2012)、蚀变-矿化特征 (郑文宝等, 2010; 郭娜等, 2012)、成岩成矿年代学 (应立娟等, 2009; Ying et al., 2014)、流体演化 (周云等, 2011)、成矿物质来源 (应立娟等, 2011; 李永胜等, 2012) 等方面进行了大量的研究工作, 提出甲玛矿床属于与斑岩成矿系统有关的斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床, 在该成矿理论的指导下, 找矿取得了重大突破。矿床的研究程度较高, 但对典型矿物, 如黑云母的成因矿物学、矿物化学与找矿矿物学研究方面还相对比较缺乏。甲玛铜多金属矿床的黑云母主要为 2 类: 一类是原生黑云母, 属于成矿前; 另一类是岩浆热液形成的热液黑云母。原生黑云母

包括角岩化热变质过程中形成的黑云母以及岩浆过程中形成于岩体中的岩浆黑云母;热液黑云母为岩浆-热液过程形成于角岩和岩体中的黑云母。本文以角岩和斑岩中不同产状黑云母为研究对象,运用莱卡 DM2500P 偏光显微镜观察和电子探针 (EPMA) 测试,研究黑云母的矿物学、矿物学化学特征,着重探讨其与成岩成矿的关系。

1 矿床地质概况

甲玛矿区位于西藏特提斯构造域冈底斯-念青唐古拉(地体)板片中南部(图 1)。冈底斯-念青唐古拉地体,由北向南分为:班戈-嘉黎早燕山期陆缘岩浆弧、措勤-纳木错晚燕山期弧后盆地、念青唐

古拉断隆、冈底斯晚燕山期—早喜马拉雅期陆缘岩浆弧 4 个次级构造单元。矿区位于冈底斯晚燕山期—早喜马拉雅期陆缘岩浆弧中段北部,位于甲玛-驱龙-邦铺铜钼多金属矿集区,该矿集区已探明铜资源量接近 2000 万吨,钼资源量超过 150 万吨(唐菊兴等,2012),是青藏高原工作程度最高、探明资源量最大的矿集区,也是中国重要的资源接续基地。

甲玛矿区及邻近区域主要包括上三叠统麦隆岗组、中-下侏罗统叶巴组、上侏罗统却桑温泉组和多底沟组、下白垩统林布宗组、楚木龙组、塔龙拉组。

矿区主要出露碎屑-碳酸盐岩系,包括上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩(矿体底板,局部大理岩中发育一些小矿体),下白垩统林布宗组砂板岩、角岩(矿体顶板,部分角岩铜钼矿化强烈)以及牛马

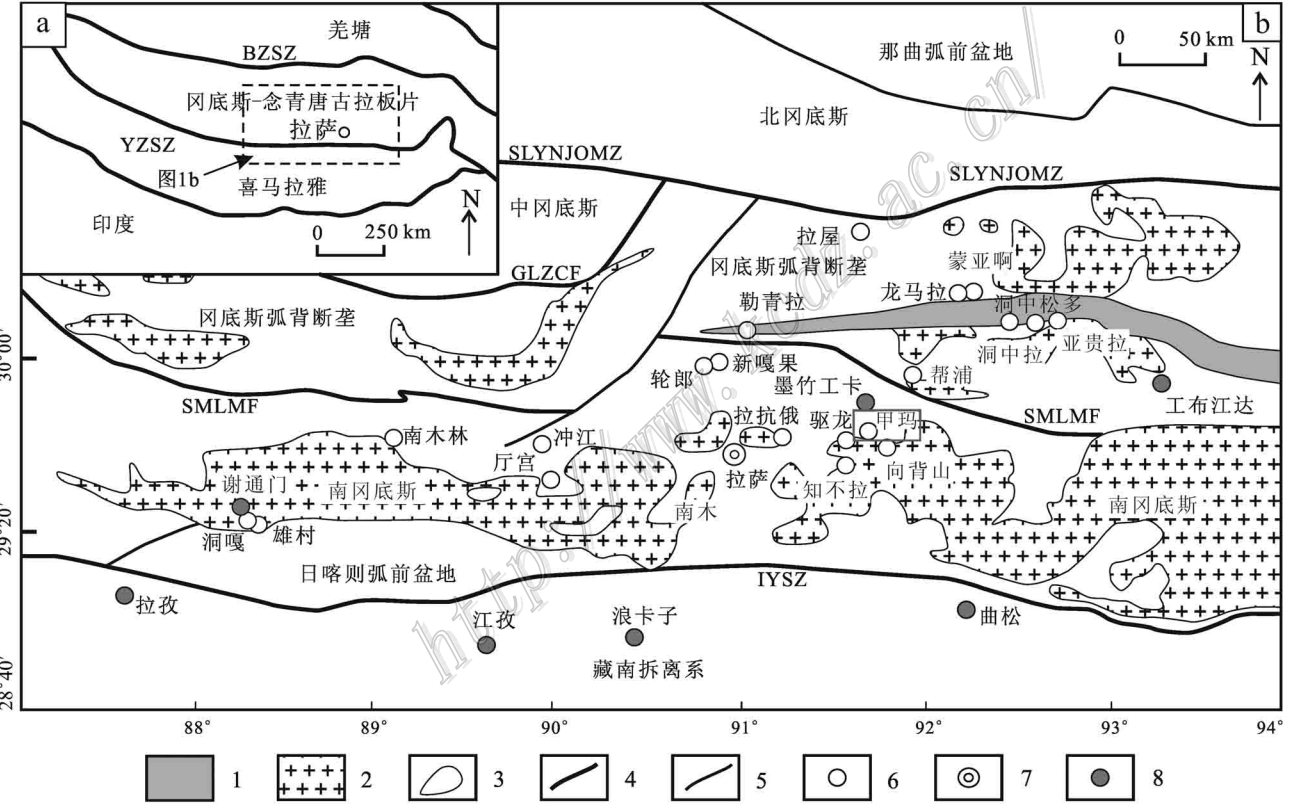


图 1 西藏大地构造简图(a)和冈底斯地区构造单元划分及矿产分布图(b)(据程文斌等,2010;唐菊兴等,2012 修编)

1—中二叠统标志层;2—岩浆岩;3—地质界线;4—缝合带;5—断层;6—矿区;7—省会;8—县

BASZ—班公湖-怒江缝合带;IYSZ—雅鲁藏布江缝合带;GLZCF—噶尔-隆格尔-扎日南木错-错麦断裂带;SLYNJOMZ—狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿岩带;SMLMF—沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂

Fig. 1 Tectonic diagram of Tibet and Geological unit division and mineral distribution of Gangdise region (modified after Cheng et al., 2010; Tang et al., 2012)

1—Middle Permian marker bed; 2—Magmatite; 3—Geological boundary; 4—Suture zone; 5—Fault; 6—Mining area; 7—Provincial capital; 8—County

BASZ—Bangong Co-Salween River suture zone; IYSZ—Yarlung Zangbo River suture zone; GLZCF—Gaer-Longgeer-Zharinanmucuo-Cuo main fault zone; SLYNJOMZ—Siquanhe-Laguocuo-Yongzhu-Namucuo-Jiali ophiolite zone; SMLMF—Shamolei-Maila-Luobadui-Milasha fault

塘一带分布有少量第四系。上侏罗统多底沟组与下白垩统林布宗组呈整合接触关系,整体倾向北东,倾角约为 40°。矽卡岩呈层状产于林布宗组与多底沟组的层间,铜、钼、铅、锌、金、银矿化十分强烈(地质图见郑文宝等,2010,图 1)。

矿区岩浆岩以类型复杂的侵入岩为主,岩石类型主要有花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩,以及少量的石英闪长玢岩、辉绿玢岩、云斜煌斑岩、闪斜煌斑岩、闪长细晶岩、花岗细晶岩。这些岩体呈岩脉、岩盆、岩墙、岩枝状侵位于林布宗组及多底沟组中,其分布形式有 2 种:一种是在近东西向及近南北向呈雁列式分布;另一种在近东西、近南北向、北西-南东向呈放射状展布。

甲玛矿床属于斑岩成矿系统,成矿元素丰富,以 Cu 为主成矿元素,共生 Mo、Pb、Zn,伴生 Au、Ag。矿床主矿体为矽卡岩型铜多金属矿体和角岩型铜钼矿体。矽卡岩型矿体呈层状、似层状赋存于下白垩统林布宗组(K_1l)砂板岩、角岩(顶板)与上侏罗统多底沟组(J_3d)灰岩、大理岩(底板)的层间构造中,或甲玛-卡军果推覆构造体系中多底沟组(J_3d)灰岩、大理岩中,呈似层状、透镜体以及巨厚状(局部厚度超过 200

m);角岩矿体赋存于林布宗组角岩中。此外,少量隐伏花岗斑岩脉中铜钼矿化也很强烈,规模较小。矿床蚀变系统与典型的斑岩成矿系统的蚀变相似,呈环带状分布,主要包括早期热蚀变(角岩化与大理岩化)与晚期典型斑岩矿床的热液蚀变以及矽卡岩蚀变。矿床热液蚀变系统主要包括了钾化带、青磐岩化带、绢英岩化带、泥化带与岩帽,由岩体中心向外呈环带状依次分布(郑文宝等,2012)。

2 样品采集、描述及分析方法

本次研究的样品主要采自矿区 24 号勘探线,共计 128 件,取样位置见图 2。该勘探线位于成矿中心,产出角岩型铜钼(金银)矿体、斑岩型钼(铜)矿体和矽卡岩型铜钼铅锌(金银)矿体,代表整个矿区的矿化蚀变情况,因此,对该勘探线角岩和岩体中的黑云母进行系统的取样。

花岗斑岩呈灰白色或乳白色,中-细粒斑状结构,块状构造;斑晶含量约占总含量的 30%~35%,成分主要为斜长石、钾长石、石英以及少量黑云母和角闪石(图 3);基质为长英质,隐晶质细粒结构有斜

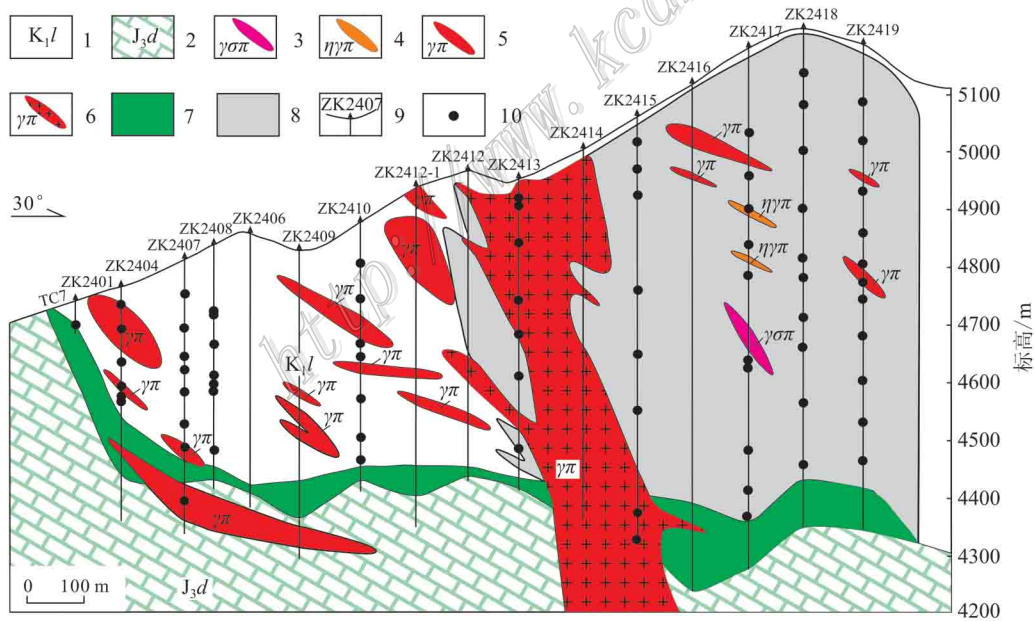


图 2 甲玛矿床 24 号勘探线剖面及取样位置图

1—林布宗组角岩; 2—多底沟组大理岩; 3—花岗闪长斑岩; 4—二长花岗斑岩; 5—花岗斑岩; 6—斑岩型矿体; 7—矽卡岩型矿体; 8—角岩型矿体; 9—钻孔; 10—取样位置

Fig. 2 Sampling location and geology along No. 24 exploration line in the Jiamama ore deposit

1—Linbuzong Formation; 2—Duodigou Formation; 3—Granodiorite porphyry; 4—Monzonite granite porphyry; 5—Granite porphyry; 6—Porphyry-type orebody; 7—Skarn-type orebody; 8—Hornfels-type orebody; 9—Drill hole; 10—Sampling location

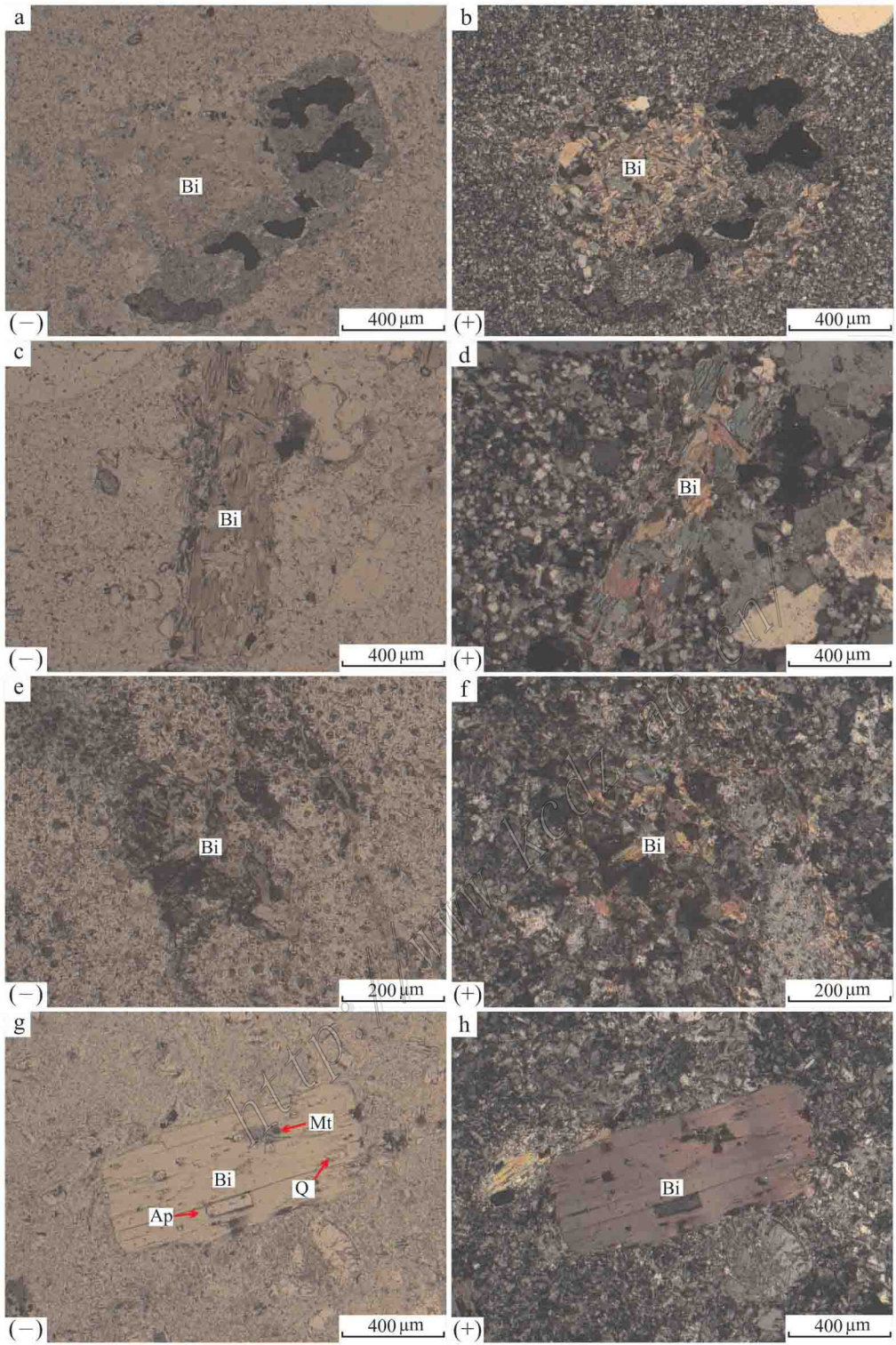


图 3 甲玛矿床岩体中的黑云母

a~b. ZK2419-404.3 花岗斑岩:热液黑云母呈片状或鳞片状交代角闪石,呈角闪石假象; c~d. ZK2415-678.3 花岗斑岩:热液黑云母呈片状或鳞片状交代岩浆黑云母,呈岩浆黑云母假象; e~f. ZK2419-574.6 花岗斑岩:热液新生黑云母以片状呈脉状和片状散布于斑岩基质; g~h. ZK2413-200.5 花岗斑岩:自形片状岩浆黑云母包裹早期结晶的磁铁矿
Bi—黑云母; Q—石英; Mt—磁铁矿; Ap—磷灰石; (-)—单偏光; (+)—正交偏光

Fig. 3 Biotite from rock mass in the Jiama deposit

a~b. ZK2419-404.3 granite porphyry: hydrothermal biotite, flaky or scaly, exhibiting pseudomorph from the replacement of hornblende;
 c~d. ZK2415-678.3 granite porphyry: hydrothermal biotite, flaky or scaly, exhibiting pseudomorph from the replacement of magmatic biotite;
 e~f. ZK2419-574.6 granite porphyry: hydrothermal newborn biotite, flaky or veinlike, dispersed in porphyry matrix; g~h. ZK2413-200.5
 granite porphyry: Magma biotite, euhedral- flaky, parceling early crystallized magnetite
 Bi—Biotite; Q—Quartz; Mt—Magnetite; Ap—Apatite; (—)—Plainlight; (+)—Crossed nicols

长石,由不规则钾长石和细粒石英组成,组分变化大,可见少量细粒板状的黑云母;另有少量副矿物,包括榍石、锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等(图4);主要有硅化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化及碳酸盐化,部分可见黄铁绢英岩化及矽卡岩化;矿化以辉钼矿化为主,呈石英-辉钼矿脉产出,以及少量浸染状黄铜矿化(秦志鹏等,2011)。

经系统的岩芯编录和详细的手标本和显微镜下观察,选取样品磨制成标准的电子探针片,利用莱卡DM2500P偏光显微镜进行镜下观察和照相。电子探针测试在长安大学国土资源部成矿作用及其动力学开放研究实验室测试完成,仪器型号为JXA-8100型电子探针(EPMA)测试电压20 kV,电流为 2.0×10^{-8} A,实际分析束斑直径 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。S检测限为 50×10^{-6} , Sb检测限 $\geq 80 \times 10^{-6}$, F检测限为 500×10^{-6} , Fe、Mn、Na元素检测限 $\geq 200 \times 10^{-6}$, Si、Al、Ti、Ca、K、Mg、Cr、P、Ba、Zr、Cu、Mo元素检测限 $\geq 100 \times 10^{-6}$ 。岩、矿石被王水、氢氟酸、高氯酸溶解,其Cu、Mo质量分数通过原子吸收光谱方法测得。

3 黑云母产状及矿物学特征

甲玛铜多金属矿床的黑云母主要赋存于岩体和角岩中,按成因又可分为原生黑云母(属于成矿前)和热液黑云母,详细描述见下文。从手标本来,原生黑云母呈斑晶、斑点状、条带状分布;热液型黑云母呈现浸染状、团斑状、脉状等形态。

3.1 岩体中的黑云母

岩体中的黑云母主要产于花岗斑岩和花岗闪长斑岩中,原生黑云母为岩浆期黑云母,呈斑晶;热液黑云母主要为热液交代黑云母和热液新生黑云母。

热液黑云母分为热液交代黑云母和热液新生黑云母。热液交代黑云母部分或全部交代早期的角闪石和岩浆黑云母,呈被交代矿物的晶形,镜下呈深棕褐色到浅黄色,多呈半自形的片状,多色性强,解理

较完全,粒径一般为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ (图3a~d)。热液新生黑云母主要为片状,呈脉状、似脉状或弥散状分布于斑岩基质中,镜下呈深棕褐色-浅黄色,多呈自形-半自形的片状,多色性强,解理较完全,粒径一般为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ (图3e~f)。原生黑云母呈斑晶产出,镜下呈深棕褐色到浅黄色,多为自形-半自形的片状,多色性强,解理完全,粒径一般为 $0.8 \sim 4.0 \text{ mm}$,包裹早期结晶的磁铁矿、磷灰石等副矿物(图3g~h)。

3.2 角岩中的黑云母

(1) 热液黑云母

岩浆分异的热液在角岩内部或裂隙中形成的热液黑云母,按照典型的矿物共生组合和黑云母形态特征,可分为4类:

A类 黑云母细脉,晶形较差,多呈他形-半自形片状、鳞片状,镜下呈褐色-浅黄色,多色性较强,解理发育较差,粒径一般为 $1 \sim 20 \mu\text{m}$,常与石英、黄铁矿、黄铜矿共生,脉体中黑云母含量较少(图4a~c)。

B类 石英+黑云母脉,角岩中最主要的一类热液黑云母,黑云母大部分都分布在脉体两侧,晶形发育好,多为自形-半自形片状,镜下呈棕褐色-浅黄色,多色性强,解理发育完全,粒径一般为 $10 \sim 300 \mu\text{m}$,与石英共生产出,脉体中黑云母含量较多(图4d~f)。

C类 石英+黑云母+绿泥石脉,晶形发育好,多为自形-半自形片状,镜下呈棕褐色-浅黄色到浅绿色,多色性强,解理发育较好,粒径一般为 $2 \sim 200 \mu\text{m}$,与石英、绿泥石、黄铁矿、黄铜矿共生产出,脉体中黑云母含量较多(图4g~i)。

D类 石英+黑云母+钠长石脉,晶形发育一般,多为半自形-他形片状,镜下呈棕褐色-浅黄色,多色性较强,解理发育较好,粒径一般为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$,与石英、钠长石共生产出,脉体中黑云母含量中等(图4j~k)。

这4类角岩热液黑云母的产出位置较为纷杂,且它们也没有体现出明显的分带特征,只要成矿热液流体影响到的区域,都可以发现上述类型黑云母。

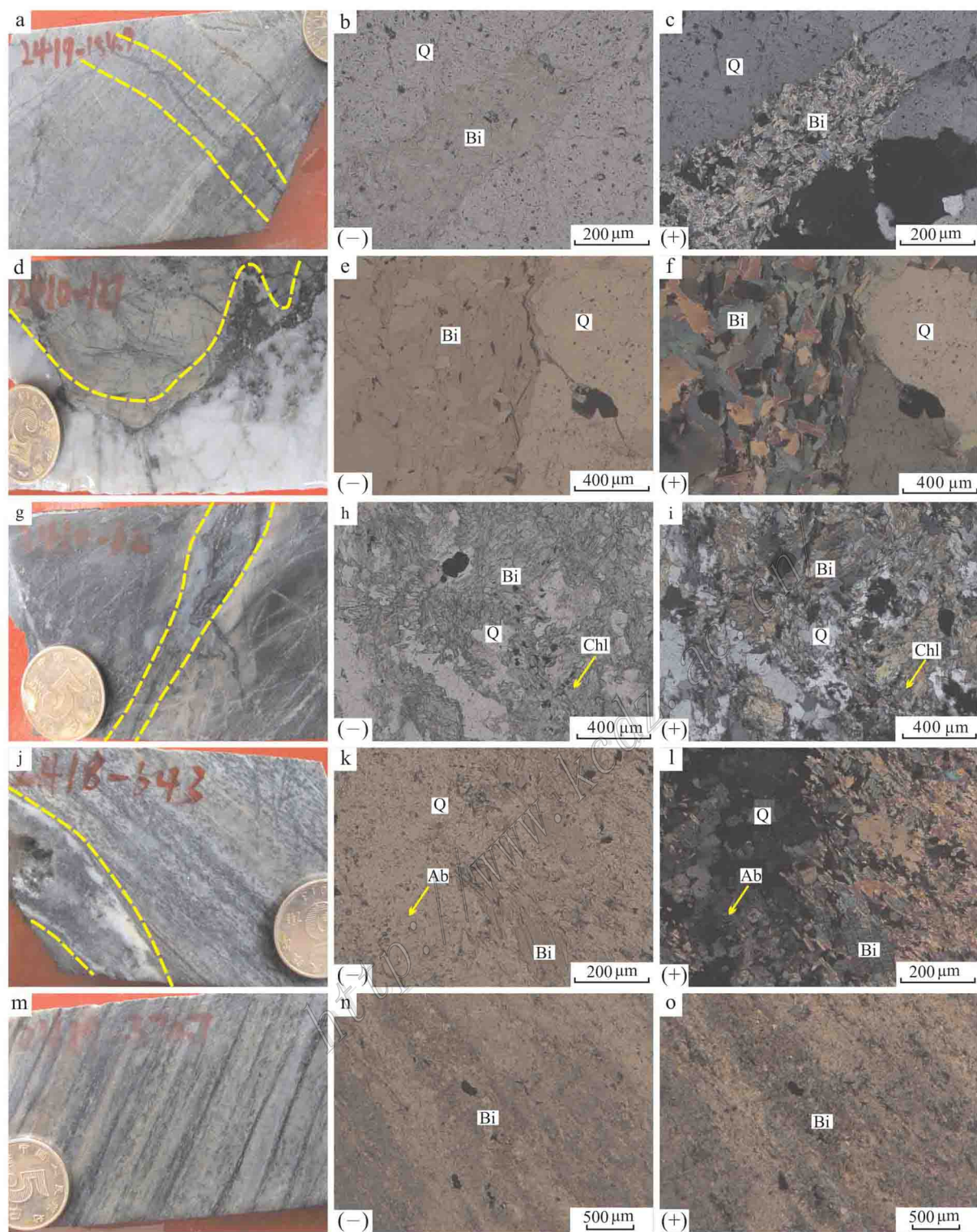


图 4 甲玛矿床角岩中的黑云母

a~c. ZK2419-154. 9-Λ 类热液黑云母; d~f. ZK2410-127-B 类热液黑云母; g~i. ZK2404-202-C 类热液黑云母; j~l. ZK2418-388. 4-D 类热液黑云母; m~o. ZK2419-370. 7-角岩中斑点状和条带状原生黑云母

Q—石英; Bi—黑云母; Chl—绿泥石; Ab—钠长石; (-)—单偏光; (+)—正交偏光

Fig. 4 Biotite from hornfels in the Jiama deposit

a~c. ZK2419-154. 9-Λ type-hydrothermal biotite; d~f. ZK2410-127-B type-hydrothermal biotite; g~i. ZK2404-202-C type-hydrothermal biotite; j~l. ZK2418-388. 4-D type-hydrothermal biotite; m~o. ZK2419-370. 7-Spotted and banded protogenic biotite in hornfels;

Q—Quartz; Bi—Biotite; Chl—Chlorite; Ab—Albite; (-)—Plainlight; (+)—Crossed nicols

(2) 原生黑云母

角岩化热变质过程中形成的黑云母, 为斑点状黑云母、条带状黑云母。斑点状原生黑云母晶形较差, 分布于角岩基质中, 与石英、钠长石等矿物共生(图 4m~o)。条带状黑云母, 大部分可见晶形, 晶形较差, 多为他形-半自形片状、鳞片状, 镜下呈褐色到浅黄色, 多色性较强, 解理发育较差, 粒径一般为 1~20 μm , 常与石英、黄铁矿、黄铜矿共生产出呈条带状(图 4m~o), 受后期热液改造较强。

4 黑云母矿物化学特征

黑云母电子探针分析结果见表 1。分析结果采用郑巧荣(1983)的计算方法, 采用阳离子总数 8、阴离子负电价 23 的理论值, 计算黑云母的阳离子系数及相关参数(表 2)。与原生黑云母相比, 角岩中的热液黑云母中 Mg 含量的升高, Cu 含量升高, Fe 含量降低, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 分异程度增大; 岩体中的热液黑云母 Ti 含量降低, Fe 含量降低, Mg 含量升高, Cu 含量升高。

4.1 镁铁含量

角岩 原生黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ (全铁) 为 9.14%~16.70%, 平均值 13.21%, $w(\text{MgO})$ 为 10.83%~16.51%, 平均值 13.53%; 热液黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ (全铁) 为 3.62%~14.40%, 平均值 8.31%, $w(\text{MgO})$ 为 12.30%~23.27%, 平均值 18.22%。原生黑云母 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 阳离子个数比为 1.16~3.22, 平均值 2.02; 热液黑云母 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 阳离子个数比为 1.53~9.95, 平均值 4.52。从质量分数和阳离子个数比较而言, 角岩中的 2 类黑云母都显示了高镁高铁的特征, 且 Mg^{2+} 个数都大于 $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 的个数, 指示趋于富镁特征。

岩体 原生黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ (全铁) 为 16.31%~16.90%, 平均值 16.55%, $w(\text{MgO})$ 为 13.61%~14.39%, 平均值 14.14%; 热液黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ (全铁) 为 14.67%~15.46%, 平均值 15.07%, $w(\text{MgO})$ 为 16.11%~17.22%, 平均值 16.67%。原生黑云母 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 阳离子个数比为 1.46~1.57, 平均值 1.52; 热液黑云母 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 阳离子个数比为 1.96~1.99, 平均值 1.97。由质量分数和阳离子个数比较而言, 岩体中的 2 类黑云母都显示了高镁高铁的特征, 且 Mg^{2+} 个数都大于 $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 个数, 具有趋于富镁特征。

Stone(2000)的研究表明, $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值的均一程度可以反映角闪石物源氧化状态的差异; 李鸿莉等(2007)和刘彬等(2010)认为, $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值的均一程度可以判断黑云母是否遭受后期热液流体的改造。角岩中原生黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值为 0.08~0.28, 均值为 0.18, 标准差为 0.09; 热液黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值为 0~0.24, 均值为 0.07, 标准差为 0.08。另外, 原生黑云母的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为 1.10~5.17, 平均值 2.04; 热液黑云母许多样品都不含 Fe^{2+} 。角岩中原生黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值均一程度都较低, 说明原生黑云母遭受热液改造; 另外, 从原生黑云母到热液黑云母 Fe^{3+} 相对含量逐渐升高, 而 Fe^{2+} 相对含量逐渐减低, 指示从原生黑云母到热液黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} 体系经历了较大的分异。 Fe^{3+} - Fe^{2+} 体系变化趋势说明岩浆-热液流体体系逐渐向氧化态过渡, 反映黑云母形成于硫化物大量沉淀前。岩体中原生黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值为 0.19~0.27, 均值 0.24, 标准差为 0.03; 热液黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值为 0.17~0.34, 均值 0.25, 标准差为 0.12。同时, 原生黑云母 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为 0.83~1.79, 平均值 1.12; 热液黑云母 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为 0~1.52, 平均值 0.76。由于岩体中原生黑云母和热液黑云母样品较少, 未表现明显的变化趋势。

将不同产状黑云母电子探针数据投影于黑云母 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ -Si 分类图解(图 5)中, 角岩中的原生黑云母靠近富镁黑云母, 而热液黑云母在富镁黑云母区域和金云母区域均有分布; 岩体中的 2 类黑云母在富镁黑云母区域和金云母区域均有分布。将不同产状黑云母电子探针数据投影于黑云母 $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})-(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$ 分类图解(图 6)中, 也显示角岩中的原生黑云母主要落在镁质黑云母的左侧边界上, 热液黑云母落在镁质黑云母的左侧边界上和金云母区域; 岩体中的原生黑云母和热液黑云母主要为镁质黑云母。

4.2 钛铝含量

角岩中原生黑云母的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 17.97%~21.12%, 平均值 19.93%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 1.13%~2.77%, 平均值 2.02%; 热液黑云母的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 10.35%~21.53%, 平均值 16.50%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.05%~3.16%, 平均值 1.43%。傅金宝(1981)认为,

表 1 甲玛矿床黑云母电子探针成分
Table 1 Electron microprobe analyses of representative biotites from the Jiama deposit

产状	样品编号	$w(B)/\%$														总和
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	NiO	CuO	MoO ₃	
A类热液黑云母: 黑云母细脉	ZK2418-201.1-2	39.92	1.44	15.95	8.43	0.13	17.98	—	0.23	8.92	0.06	0.01	—	—	0.05	93.12
	ZK2417-532-2	35.38	1.98	20.63	14.40	0.30	12.39	0	0.13	10.21	0.19	0.02	—	0.10	—	95.73
	ZK2417-135.1	40.75	1.74	20.57	6.87	0.03	12.30	0.04	0.24	8.98	0.15	—	0.01	0.08	0.02	91.78
	ZK2417-135.1-1	37.04	1.84	18.06	10.45	0.03	14.96	0.02	0.21	9.67	0.08	0.01	0.03	0.13	0.07	92.60
	ZK2417-208.2-1	37.59	1.82	19.36	7.31	0.01	17.73	0.05	0.12	9.99	0.10	—	0.07	0.09	—	94.24
	ZK2417-208.2-2	37.24	2.29	18.82	7.43	—	17.00	0.02	0.22	10.09	0.07	—	0.01	0.02	—	93.21
	ZK2417-545.2-1	32.95	1.55	21.53	14.05	0.26	12.79	0.01	0.12	10.18	0.05	—	—	—	—	93.49
	ZK2417-545.2-2	36.97	1.12	16.67	12.50	0.32	16.17	—	0.18	9.62	0.14	0.05	—	0.01	—	93.75
	ZK2417-760.1-1	40.02	0.88	13.59	5.96	0.07	22.90	0.01	0.17	10.16	0.02	—	0.11	0	—	93.89
	ZK2417-806.2	41.15	2.18	12.55	6.75	0.16	21.04	0.03	0.11	10.01	0.09	—	0.08	0.05	—	94.20
B类热液黑云母: 石英+黑云母脉	ZK2418-423-1	35.54	1.50	14.64	6.45	0.07	20.88	0	0.20	10.48	0.05	—	0.06	0.01	—	89.88
	ZK2418-543.1	39.53	1.15	13.75	5.62	—	22.02	0.02	0.09	9.95	0.08	—	0.10	—	—	92.31
	ZK2418-749.1	43.07	1.62	10.35	4.91	0.12	22.27	0.04	0.14	8.93	0.07	—	0.07	—	—	91.59
	ZK2404-165.2-2	36.31	2.92	19.67	10.25	0.11	15.06	0.01	0.19	9.62	0.05	—	0.05	0.02	0.02	94.28
	ZK2415-78.4-1	36.12	0.22	17.54	7.64	0.11	17.66	0.01	0.11	11.20	0.11	0.05	—	0.01	0.02	90.80
	ZK2415-124.4-1	41.16	0.08	12.68	4.51	0.02	22.95	0.03	0.19	11.58	—	—	—	—	—	93.20
	ZK2415-124.4-2	42.39	0.13	12.88	4.17	0.01	23.27	0.03	0.10	11.68	—	—	—	0.03	0.06	94.75
	ZK2410-124.1-1	41.95	0.10	12.72	6.24	0.09	23.19	0.01	0.11	11.43	0.08	—	—	0.03	—	95.95
	ZK2410-124.1-2	40.83	0.10	14.41	7.95	—	20.57	0.03	0.09	12.09	0.03	0.07	0.01	—	0.09	96.27
	ZK2410-366.1-1	39.12	0.05	16.35	10.11	0.03	18.24	—	0.15	10.60	0.04	—	0.05	—	—	94.74
C类热液黑云母: 石英+绿泥石+黑云母脉	ZK2410-366.1-2	38.36	0.13	15.57	11.05	—	17.01	0.02	0.11	11.95	0.05	0.05	0.09	0.02	0.03	94.44
	ZK2417-329.1-1	37.43	1.46	19.91	5.80	0.01	17.79	—	0.12	9.86	0.08	—	—	—	—	92.46
	ZK2417-329.1-2	38.68	1.76	17.63	7.43	0.04	17.66	0	0.21	9.41	0.19	—	0.03	—	—	93.04
	ZK2417-329.1-3	36.32	1.23	19.93	6.06	0.06	17.63	0.01	0.22	9.60	0.13	—	0.07	0.03	0.10	91.39
	ZK2417-329.1-4	36.55	1.59	20.72	8.48	—	16.30	—	0.31	10.25	0.10	0.02	0.01	0.04	0.08	94.45
	ZK2417-329.1-5	36.38	1.48	20.53	8.67	0.01	15.59	0.01	0.21	10.00	—	—	0.06	—	0.06	93.00
	ZK2417-690.8-1	40.56	1.90	15.52	8.49	0.08	18.56	0.04	0.07	9.62	0.14	—	0.02	—	0.06	95.06
	ZK2417-690.8-2	39.20	1.34	14.57	8.35	0.01	20.26	0.02	0.17	10.47	0.08	0.01	0.02	0.09	0.04	94.63
	ZK2404-131.2-2	38.28	2.80	17.99	9.16	0.16	16.50	—	0.16	9.80	0.05	—	—	—	—	94.90
	ZK2404-202.2-1	40.44	2.86	14.32	11.47	0.16	16.75	0	0.14	9.15	0.11	0.02	0.03	—	0.02	95.47
	ZK2404-202.2-2	34.61	3.16	15.11	12.81	0.26	14.78	0.05	0.17	9.20	0.17	—	0.05	0.03	0.02	90.42
	ZK2410-62-1	39.16	0.07	13.66	10.74	0.10	19.24	0.01	0	10.32	0.06	0.01	—	—	0.08	93.45

续表 1

Cont. Table 1

产状	样品编号	w(B)/%														总和
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	NiO	CuO	MoO ₃	
D 类热液黑云母： 石英 + 钠长石 + 黑云母脉	ZK2417-266.6-1	39.02	1.08	16.72	3.62	0.03	19.51	0.06	0.21	7.91	0.27	0.04	0.03	-	0.06	88.56
	ZK2417-385.4-1	38.06	1.67	18.74	9.60	0.09	15.70	0.01	0.20	10.11	0.19	0.07	-	-	-	94.44
	ZK2418-388.4-1	39.01	2.50	16.67	8.81	0.02	19.00	-	0.15	10.35	0.04	-	0.12	-	0.02	96.69
	ZK2418-643-1	41.44	1.60	13.84	6.70	0.02	22.23	-	0.10	9.92	0	0.03	0.07	-	0.02	95.97
角岩中斑点状原生 黑云母	ZK2417-532-1	34.81	1.81	20.77	14.74	0.20	12.57	-	0.30	9.72	0.10	-	0.09	0.04	0.01	95.16
	ZK2417-760.1-2	33.25	2.27	20.35	15.80	0.19	11.01	-	0.17	9.45	0.06	-	-	0	0	92.55
	ZK2404-131.2-1	39.17	1.13	18.63	9.85	0.17	16.44	-	0.12	9.95	0.11	0.03	0.05	0	0	95.65
	ZK2404-165.2-1	38.94	2.77	17.97	9.14	0.12	16.51	0.02	0.23	9.97	0.05	0.03	0.02	0.01	0	95.78
角岩中条带状原生 黑云母	ZK2418-643-2	34.51	2.10	21.12	16.70	0.25	10.83	-	0.17	10.11	0.08	-	0.06	0.02	0	95.95
	ZK2417-385.4-2	34.31	2.07	20.77	13.04	0.05	13.84	-	0.17	10.16	0.13	0.03	0.07	0.05	0.03	94.72
岩体中的原生黑云母 (岩浆黑云母)	ZK2413-200.5-2	37.41	3.76	13.80	16.59	0.14	13.61	0.02	0.22	9.52	0.19	0.01	-	0.05	0.03	95.35
	ZK2413-200.5-3	36.15	3.96	13.91	16.90	0.16	14.22	0.05	0.27	9.65	0.15	0.02	0.05	0.05	0	95.54
	ZK2413-261.6	37.46	3.90	13.54	16.31	0.07	14.39	0.02	0.16	9.43	0.27	-	0.07	0	0.08	95.70
	ZK2413-261.6-1	37.19	3.85	13.55	16.41	0.17	14.33	-	0.20	9.32	0.10	0.07	0	0.06	0	95.25
岩体中的热液黑云母	ZK2404-177	33.88	0.08	22.05	15.46	0.17	17.22	-	0	9.35	0.01	0.02	-	0.09	-	98.33
	ZK2413-200.5-4	38.85	1.44	13.87	14.67	0.03	16.11	-	0.18	9.18	0.68	-	-	0.25	-	95.26

注：“-”表示低于检出限。

表 2 甲玛矿床黑云母电子探针成分阳离子数计算结果
Table 2 Cations of electron microprobe analyses of representative biotites from the Jiama deposit

产状	样品编号	Si	Al ^{IV}	四面体位置	Al ^{VI}	Ti	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Ca	八面体位置	K	Na	Interlayer
A 类热液黑云母: 黑云母细脉	ZK2418-201.1-2	5.79	2.21	8.00	0.51	0.16	3.89	0.53	0.49	0.02	0	5.59	1.65	0.06	1.71
	ZK2417-532-2	5.15	2.85	8.00	0.68	0.22	2.69	0.69	1.06	0.04	0	5.37	1.89	0.04	1.93
	ZK2417-135.1	5.95	2.05	8.00	1.50	0.19	2.68	0.84	0	0	0.01	5.21	1.67	0.07	1.74
	ZK2417-135.1-1	5.48	2.53	8.00	0.62	0.21	3.30	0.52	0.77	0	0	5.42	1.82	0.06	1.88
	ZK2417-208.2-1	5.36	2.64	8.00	0.61	0.20	3.77	0	0.87	0	0.01	5.46	1.82	0.03	1.85
	ZK2417-208.2-2	5.38	2.62	8.00	0.58	0.25	3.66	0.04	0.86	0	0	5.39	1.86	0.06	1.92
	ZK2417-545.2-1	4.86	3.14	8.00	0.60	0.17	2.81	0.20	1.54	0.03	0	5.35	1.92	0.04	1.95
	ZK2417-545.2-2	5.39	2.61	8.00	0.26	0.12	3.52	0.19	1.33	0.04	0	5.46	1.79	0.05	1.84
	ZK2417-760.1-1	5.61	2.25	8.00	0.15	0.09	4.79	0	0.70	0.01	0	5.44	1.82	0.05	1.86
	ZK2417-806.2	5.85	2.10	8.00	0.05	0.23	4.46	0	0.80	0.02	0.01	5.46	1.81	0.03	1.85
B 类热液黑云母: 石英 + 黑云母脉	ZK2418-423-1	5.22	2.53	8.00	0.25	0.17	4.57	0	0.79	0.01	0	5.28	1.96	0.06	2.02
	ZK2418-543.1	5.83	2.17	8.00	0.23	0.13	4.84	0	0.69	0	0	5.89	1.87	0.03	1.90
	ZK2418-749.1	6.24	1.76	8.00	0.01	0.18	4.81	0.12	0.48	0.02	0.01	5.62	1.65	0.04	1.69
	ZK2404-165.2-2	5.53	2.47	8.00	0.90	0.32	3.26	0.56	0.69	0.01	0	5.73	1.78	0.05	1.84
	ZK2415-78.4-1	5.53	2.47	8.00	0.70	0.03	4.03	0	0.98	0.01	0	5.75	2.19	0.03	2.22
	ZK2415-124.4-1	6.02	1.98	8.00	0.20	0.01	5.00	0	0.55	0	0.01	5.77	2.16	0.05	2.21
	ZK2415-124.4-2	6.08	1.93	8.00	0.25	0.01	4.97	0	0.50	0	0.01	5.74	2.14	0.03	2.16
	ZK2410-124.1-1	6.00	2.00	8.00	0.15	0.01	4.94	0	0.75	0.01	0	5.86	2.09	0.03	2.12
	ZK2410-124.1-2	5.89	2.11	8.00	0.35	0.01	4.43	0	0.96	0	0.01	5.74	2.23	0.03	2.25
	ZK2410-366.1-1	5.75	2.25	8.00	0.58	0.01	3.99	0	1.24	0	0	5.82	1.99	0.04	2.03
C 类热液黑云母: 石英 + 绿泥石 + 黑云母脉	ZK2410-366.1-2	5.75	2.25	8.00	0.50	0.02	3.80	0	1.39	0	0	5.70	2.29	0.03	2.32
	ZK2417-329.1-1	5.49	2.51	8.00	0.93	0.16	3.89	0.71	0	0	0	5.69	1.84	0.03	1.88
	ZK2417-329.1-2	5.60	2.40	8.00	0.60	0.19	3.81	0.30	0.60	0.01	0	5.51	1.74	0.06	1.80
	ZK2417-329.1-3	5.42	2.58	8.00	0.92	0.14	3.92	0.76	0	0.01	0	5.75	1.83	0.06	1.89
	ZK2417-329.1-4	5.35	2.65	8.00	0.92	0.18	3.56	1.04	0	0	0	5.69	1.91	0.09	2.00
	ZK2417-329.1-5	5.28	2.72	8.00	0.80	0.16	3.38	0.16	0.90	0	0	5.39	1.85	0.06	1.91
	ZK2417-690.8-1	5.77	2.23	8.00	0.37	0.20	3.94	0.41	0.61	0.01	0.01	5.54	1.75	0.02	1.77
	ZK2417-690.8-2	5.54	2.43	8.00	0.03	0.14	4.27	0	0.99	0	0	5.37	1.89	0.05	1.94
	ZK2404-131.2-2	5.49	2.51	8.00	0.53	0.30	3.52	0.49	0.61	0.02	0	5.47	1.79	0.04	1.84
	ZK2404-202.2-1	5.83	2.17	8.00	0.27	0.31	3.60	0.99	0.40	0.02	0	5.58	1.68	0.04	1.72
	ZK2404-202.2-2	5.31	2.70	8.00	0.03	0.36	3.38	0.47	1.17	0.03	0.01	5.46	1.80	0.05	1.85
	ZK2410-62-1	5.86	2.14	8.00	0.28	0.01	4.29	0	1.35	0.01	0	5.94	1.97	0	1.97

续表 2

Cont. Table 2

产状	样品编号	Si	Al ^{IV}	四面体位置	Al ^{IV}	Ti	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Ca	八面体位置	K	Na	Interlayer
D 类热液黑云母： 石英 + 钠长石 + 黑云母脉	ZK2417-266.6-1	5.84	2.16	8.00	0.79	0.12	4.35	0.37	0.08	0	0.01	5.74	1.51	0.06	1.57
	ZK2417-385.4-1	5.48	2.52	8.00	0.67	0.18	3.37	0.36	0.80	0.01	0	5.39	1.86	0.06	1.92
	ZK2418-388.4-1	5.44	2.56	8.00	0.18	0.26	3.95	0	1.03	0	0	5.42	1.84	0.04	1.88
	ZK2418-643-1	5.89	2.12	8.00	0.20	0.17	4.70	0	0.80	0	0	5.87	1.80	0.03	1.82
角岩斑点状原生黑云母	ZK2417-532-1	5.08	2.92	8.00	0.66	0.20	2.73	0.65	1.15	0.03	0	5.41	1.81	0.08	1.89
	ZK2417-760.1-2	5.03	2.97	8.00	0.67	0.26	2.48	0.95	1.05	0.02	0	5.43	1.83	0.05	1.87
	ZK2404-131.2-1	5.56	2.44	8.00	0.68	0.12	3.48	0.43	0.74	0.02	0	5.47	1.80	0.03	1.83
	ZK2404-165.2-1	5.53	2.47	8.00	0.54	0.30	3.50	0.49	0.60	0.02	0	5.44	1.81	0.06	1.87
角岩条带状原生黑云母	ZK2418-643-2	5.05	2.95	8.00	0.70	0.23	2.36	0.93	1.12	0.03	0	5.37	1.89	0.05	1.94
	ZK2417-385.4-2	4.99	3.01	8.00	0.55	0.23	3.00	0.26	1.33	0.01	0	5.37	1.89	0.05	1.93
岩体中的原生黑云母 (岩浆黑云母)	ZK2413-200.5-2	5.54	2.34	8.00	0.12	0.42	3.00	1.12	0.93	0.02	0	5.44	1.80	0.06	1.86
	ZK2413-200.5-3	5.33	2.16	8.00	0.26	0.44	3.12	0.75	1.34	0.02	0.01	5.41	1.81	0.08	1.89
	ZK2413-261.6	5.68	2.32	8.00	0.03	0.43	3.16	1.06	0.95	0.01	0	5.65	1.77	0.05	1.82
	ZK2413-261.6-1	5.50	2.38	8.00	0	0.43	3.16	1.03	1.00	0.02	0	5.49	1.76	0.06	1.81
岩体中的热液黑云母	ZK2404-177	5.09	2.91	8.00	0.99	0.01	3.86	1.94	0	0.02	0	6.82	0.26	0	0.26
	ZK2413-200.5-4	5.68	2.32	8.00	0.07	0.16	3.51	0.71	1.08	0	0	5.54	1.71	0.05	1.76

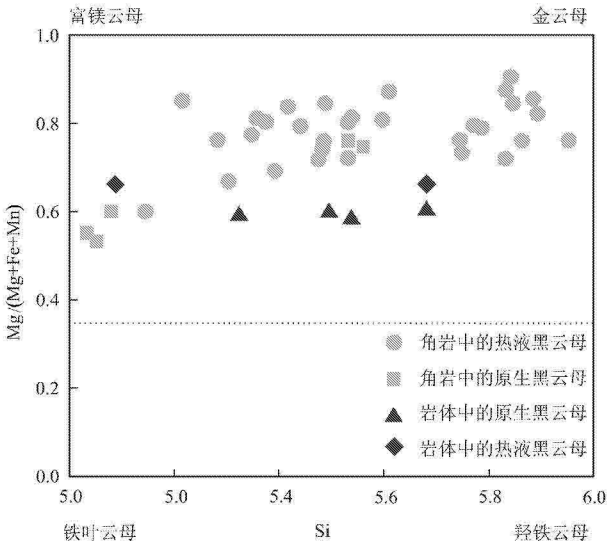


图 5 甲玛矿床原生黑云母与热液黑云母 $Mg/(Fe + Mg + Mn)$ -Si 分类图解(底图据 Kanisawa, 1983)

Fig. 5 $Mg/(Fe + Mg + Mn)$ -Si classification of primary and hydrothermal biotites in the Jiamia deposit (base map after Kanisawa, 1983)

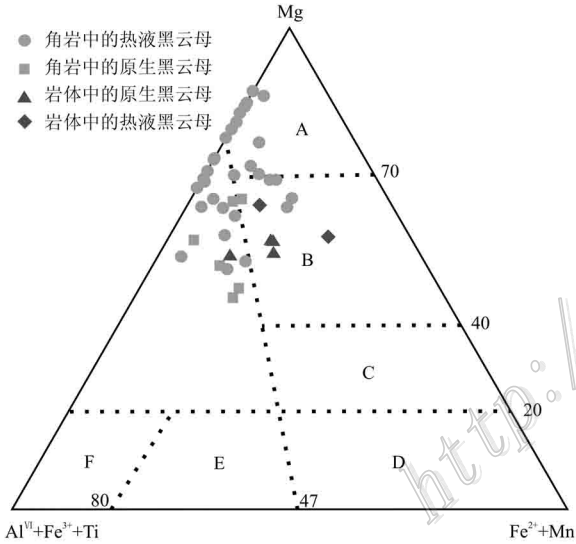


图 6 甲玛矿床原生黑云母与热液黑云母 $Mg-(Al^{IV} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$ 分类图解(底图据 Foster, 1960)

A—金云母; B—镁质黑云母; C—铁质黑云母; D—铁叶云母; E—铁白云母; F—白云母

Fig. 6 $Mg-(Al^{IV} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$ ternary classification of primary and hydrothermal biotites in the Jiamia deposit (base map after Foster, 1960)

A—Phlogopite; B—Magnesian biotite; C—Ferrobiotite; D—Siderophyllite; E—Ferro-muscovite; F—Muscovite

从岩浆黑云母(原生)到热液黑云母, $w(TiO_2)$ 与 $w(Al_2O_3)$ 具有明显反相关关系, 岩浆黑云母具有 $w(TiO_2) > 3\%$ 、 $w(Al_2O_3) < 15\%$, 高钛、低铝的特

点; 而热液黑云母具有 $w(TiO_2) < 3\%$ 、 $w(Al_2O_3) > 15\%$, 低钛、高铝的特征。岩体中原生黑云母的 $w(Al_2O_3)$ 为 $13.54\% \sim 13.91\%$, 平均值 13.70% , $w(TiO_2)$ 为 $3.76\% \sim 3.96\%$, 平均值 3.87% ; 热液黑云母的 $w(Al_2O_3)$ 为 $13.87\% \sim 22.05\%$, 平均值 17.96% , $w(TiO_2)$ 为 $0.08\% \sim 1.44\%$, 平均值 0.76% , $w(TiO_2)$ 与 $w(Al_2O_3)$ 可能具有负相关关系。

角岩的黑云母 $w(TiO_2)$ - $w(Al_2O_3)$ 协变图解(图 7) 显示, 从原生黑云母到热液黑云母, $w(TiO_2)$ 与 $w(Al_2O_3)$ 并没有显示出明显的相关性, 而岩体中从原生黑云母到热液黑云母, $w(TiO_2)$ 与 $w(Al_2O_3)$ 显示出明显的相关性; 原生黑云母向热液黑云母转化过程中, 角岩和岩体可能具有明显不同的地球化学性状。

4.3 钾钙钠含量

角岩中原生黑云母的 $w(Na_2O)$ 为 $0.12\% \sim 0.30\%$, 平均值 0.19% ; $w(CaO)$ 为 $0 \sim 0.02\%$; $w(K_2O)$ 为 $9.45\% \sim 10.16\%$, 平均值 9.90% , 这些指示其具有低钠、贫钙、高钾的特征。热液黑云母的 $w(Na_2O)$ 为 $0\% \sim 0.31\%$, 平均值 0.16% ; $w(CaO)$ 为 $0 \sim 0.06\%$, $w(K_2O)$ 为 $7.91\% \sim 12.09\%$, 平均值 10.09% , 具有原生黑云母相似的特征。岩体中原生黑云母的 $w(Na_2O)$ 为 $0.16\% \sim 0.27\%$, 平均值 0.21% ; $w(CaO)$ 为 $0 \sim 0.05\%$, $w(K_2O)$ 为 $9.32\% \sim 9.65\%$, 平均值 9.48% , 具有低钠、贫钙、高钾的特征; 热液黑云母的 $w(Na_2O)$ 为 $0 \sim 0.18\%$, 平均值

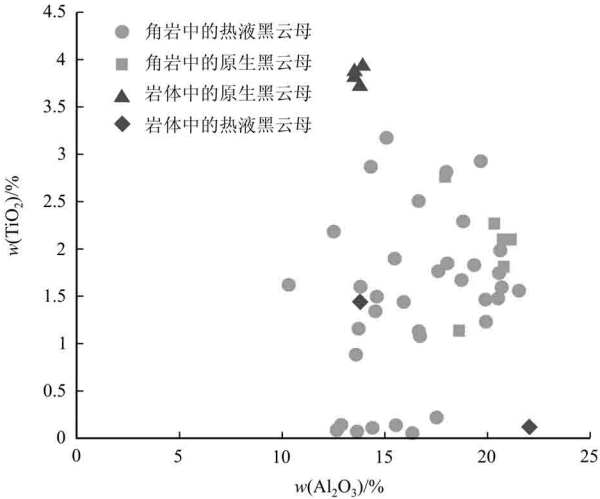


图 7 甲玛矿床原生黑云母与热液黑云母 TiO_2 - Al_2O_3 协变图解

Fig. 7 TiO_2 - Al_2O_3 correlation diagram of primary and hydrothermal biotites in the Jiamia deposit

0.09%; $w(\text{CaO})$ 为 0, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 9.18%~9.35%, 平均值 9.26%, 具有原生黑云母相似的特征, 但相比于原生黑云母, K、Na、Ca 含量都有不同程度的降低。傅金宝(1981)研究认为, 从原生黑云母到热液黑云母, K、Na、Ca 含量都有不同程度的降低, 造成原生黑云母高 K, 热液黑云母的 K 含量相对较低, 可能是由于热液黑云母含有较多的 H_3O^+ 。甲玛铜多金属矿床岩体中黑云母显示了这一特征, 而角岩中黑云母并不显示这一特征。

4.4 铜钼含量

角岩中原生黑云母的 $w(\text{CuO})$ 在 0~0.05%, 平均值 0.02%, 而 $w(\text{MoO}_3)$ 在 0~0.03%, 平均值 0.01%; 热液黑云母中 $w(\text{CuO})$ 在 0~0.13%, 平均值 0.04%, 而 $w(\text{MoO}_3)$ 0.02%~0.10%, 平均值 0.05%。岩体中原生黑云母的 $w(\text{CuO})$ 在 0~0.06%, 平均值 0.04%, $w(\text{MoO}_3)$ 在 0~0.08%, 平均值 0.03%; 热液黑云母的 $w(\text{CuO})$ 在 0.09%~0.25%, 平均值 0.17%, 而 $w(\text{MoO}_3)$ 低于检出限。

角岩中原生黑云母和热液黑云母的 $w(\text{CuO})$ 、 $w(\text{MoO}_3)$ 总体都较低, 未表现出明显的富集趋势(图 8)。岩体中的热液黑云母 $w(\text{CuO})$ 明显高于原生黑云母, 甚至可达 0.25%; 而岩体中原生黑云母和热液黑云母的 $w(\text{MoO}_3)$ 总体较低, 但原生黑云母含量较高(图 8)。

$w(\text{FeO}^T)$ 、 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 等与 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 的协变图解(图 8)显示, 角岩和岩体中原生黑云母和热液黑云母的协变图解变化趋势较为一致, 说明是由于 Fe、Mg、Al、K 等元素容易受到后期热液作用的影响而使得原生黑云母和热液黑云母的主量元素比值变化趋势协同相似。5 类热液黑云母化学成分没有显著的差别, D 类热液黑云母 $w(\text{FeO}^T)$ 较其他热液黑云母较低, 热液黑云母 $w(\text{FeO}^T)$ 较其他热液黑云母偏高。

5 黑云母对成岩成矿的指示意义

5.1 温度和氧逸度

Henry 等(2005)研究表明, 用黑云母 Ti-Mg/(Mg+Fe)图解可以估算黑云母的形成温度。将花岗斑岩中的原生黑云母投于黑云母 Ti-Mg/(Mg+Fe)图解(图 9)中, 得出黑云母结晶温度变化在 730~750℃ 之间。

Wones 等(1965)、De Albuquerque(1973)和 Wones(1989)研究表明, 与钾长石-磁铁矿-石英-角闪石共生的黑云母, 可以用其 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的原子百分数估算黑云母结晶时的氧逸度。由前文可知本矿床花岗斑岩中的黑云母符合该逸度计使用条件, 花岗斑岩中黑云母样品点均落 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg 图解(图 10)中 Fe_2O_3 - Fe_3O_4 缓冲线以上; 另外, 结合 Ti-Mg/(Mg+Fe)温度图解, 将花岗斑岩原生黑云母数据投于黑云母的 $\log f(\text{O}_2)$ - t 图解(图 11)($p = 2070 \text{ MPa}$ 条件下)(Wones et al., 1965), 得出花岗斑岩的 $\log f(\text{O}_2)$ 变化范围在 -13.0~-11.5 之间, 对应 Fe_2O_3 - Fe_3O_4 缓冲区, 表明该黑云母是在较高氧逸度条件下结晶形成的。

5.2 成因和构造环境

黑云母主量元素特征在一定程度上可以指示花岗岩的成因类型、物质来源等。周作侠(1986)通过收集全球 15 个地区和岩体中黑云母的资料, 用黑云母 $\Sigma\text{FeO}/(\Sigma\text{FeO} + \text{MgO})$ -MgO 图解判别花岗岩物质来源。甲玛花岗斑岩黑云母相应的成分投于该判别图的壳幔混源区域(图 12), 具壳幔混源的成因特点。秦志鹏(2010)研究得出花岗斑岩源区来自与下地壳-造山带, 并且具有岩浆混合的岩石学标志, 如宏观表现为基性岩浆团不规则的分布(即 MME 包体)、石英斑晶的黄铁矿边、长石的反环带及部分长石发育的筛状溶蚀结构等; 微观表现为饱和矿物与不饱和矿物的共存, 以石英和单斜辉石的共存最为常见, 石英钾长石外壳以及石英斑晶重熔表面等; 另外, 岩石地球化学数据中同样显示了岩浆混合作用影响, 主要体现在富 Cr、Ni 矿物(单斜辉石、尖晶石)的结晶分异(秦志鹏, 2010), 与本文所得结论基本一致。Abdel-Rahman(1994)对全球不同地区不同岩性的 325 个黑云母样品主量元素成分特征进行统计和系统总结, 提出用黑云母 MgO - FeO^T - Al_2O_3 图解判别构造环境(A 非造山的碱性岩系、C 造山带钙碱性岩系和 P 过铝质岩系)。甲玛花岗斑岩原生黑云母相应的成分投于该图(图 13)中的 C 区, 属于造山带钙碱性岩系; 秦志鹏(2010)对花岗斑岩作 SiO_2 - K_2O 判别图解和 SiO_2 - $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 构造判别图解, 得出花岗斑岩为高钾钙碱性系列、后造山花岗岩类(秦志鹏, 2010), 与本文所得结论基本一致。

5.3 成矿指示意义

Parry 等(1963)、Kesler 等(1975)、Hendry 等(1981)、傅金宝(1981)和秦克章等(2009)研究发现,

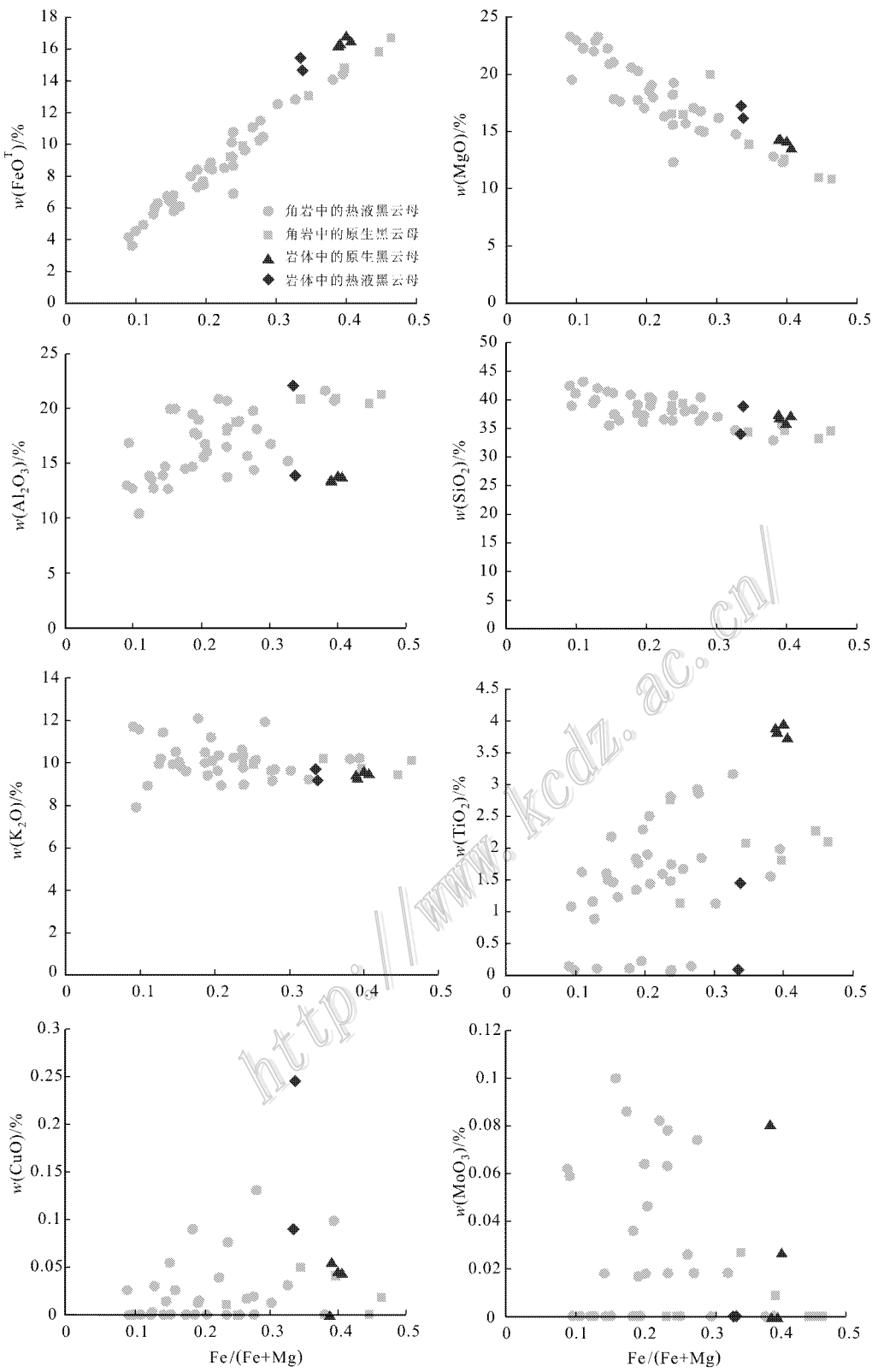


图 8 甲玛矿床原生黑云母与热液黑云母化学成分对比图(底图据李鸿莉等, 2007)

Fig. 8 Chemical composition of primary and hydrothermal biotites in the Jiamia deposit (base map after Li et al., 2007)

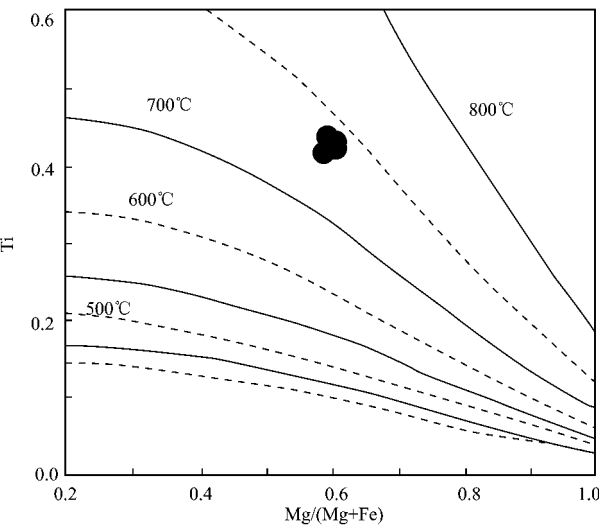


图 9 甲玛矿床黑云母 Ti-Mg/(Mg + Fe)图解
(底图据 Henry et al. , 2005)
Fig. 9 Plot of Ti-Mg/(Mg + Fe) for biotites from the
Jiama deposit (base map after Henry et al. , 2005)

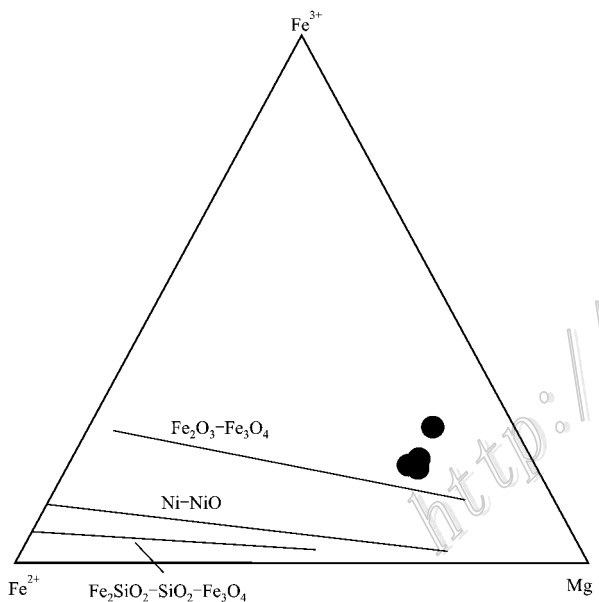


图 10 甲玛矿床黑云母 Fe³⁺-Fe²⁺-Mg 图解
(底图据 Wones et al. , 1965)
Fig. 10 Fe³⁺-Fe²⁺-Mg²⁺ diagram of biotites from
the Jiama deposit (base map after Wones et al. , 1965)

含矿岩体中黑云母的 Cu 含量较无矿岩体高,热液黑云母 Cu 含量较原生黑云母高。甲玛矿区角岩中热液黑云母和原生黑云母 Cu 含量都较低,而岩体中热液黑云母 Cu 含量明显高于原生黑云母。可能是由于岩浆侵位形成斑岩过程中,岩浆中 Cu 含量较低,而在

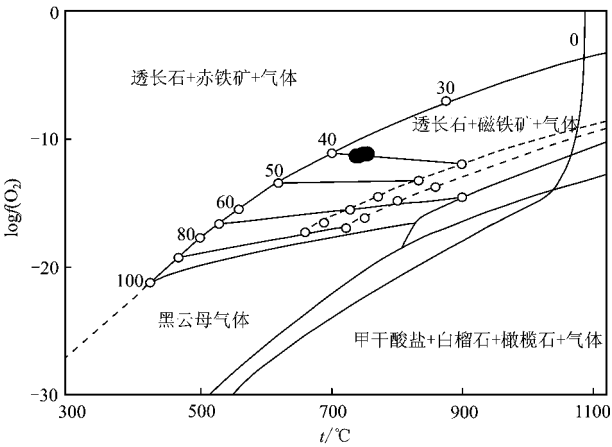


图 11 甲玛矿床黑云母的 logf(O₂)-t 图解
(底图据 Wones et al. , 1965)
数字 0~100 为黑云母的稳定性(100×Fe/(Fe + Mg))
Fig. 11 Logf(O₂)-t diagram for biotites from
the Jiama deposit (base map after Wones et al. , 1965)
The stability of biotite (100×Fe/(Fe + Mg)) : 0~100

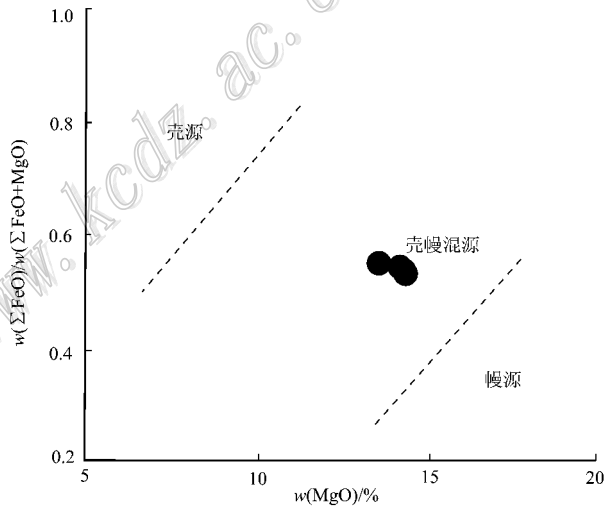


图 12 甲玛矿床黑云母 ΣFeO/(ΣFeO + MgO)-MgO
图解(底图据周作侠, 1986)
Fig. 12 Plot of ΣFeO/(ΣFeO + MgO)-MgO of biotites
from the Jiama deposit (base map after Zhou, 1986)

岩浆-热液转化过程中,热液中 Cu 含量逐渐富集,导致热液黑云母中 Cu 含量较高;随着成矿热液上升过程中 Cu 不断地沉淀,导致热液中 Cu 含量下降,角岩中热液黑云母 Cu 含量相应较低。
高的氧逸度是斑岩型和浅成低温热液矿床形成的重要条件之一,因为在高的氧逸度条件下,硫元素多以 SO₄²⁻ 和 SO₂ 形式溶解在硅酸盐熔体中,岩浆

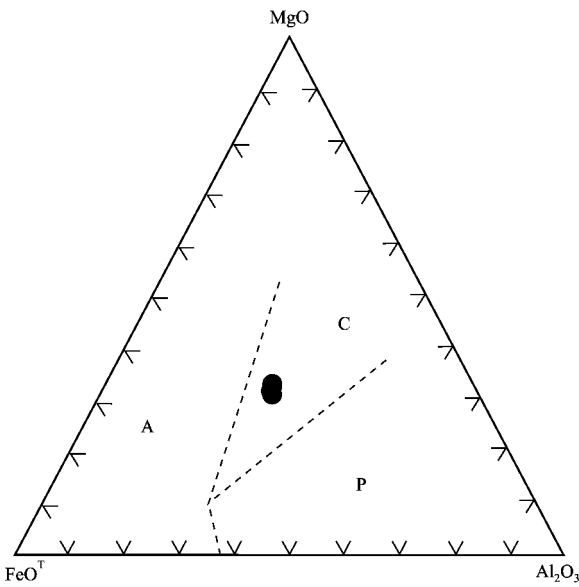


图 13 甲玛矿床黑云母构造环境判别图
(底图据 Abdel-Rahman, 1994)

A—非造山的碱性岩系；C—造山带钙碱性岩系；
P—过铝质岩系(包括 S 型)

Fig. 13 Discrimination diagram of tectonic settings for biotite from the Jiama deposit (base map after Abdel-Rahman, 1994)

A—Anorogenic alkaline suites; C—Calc-alkaline orogenic suites; P—Peraluminous suites (including S-type)

中不易产生硫化物过饱和,从而导致亲硫元素 Cu 在岩浆演化过程中逐步富集于熔体相,最终进入流体相,有利于 Cu 富集成矿作用的发生(熊小林等, 1994;Bi et al., 2009; Li et al., 2008)。由前文可知花岗斑岩的氧逸度较高($\log f(\text{O}_2) > \text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$),另外与原生黑云母相比,角岩中的热液黑云母 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值均一程度低,且 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值相对含量显著升高,甚至部分热液黑云母不含 Fe^{2+} ,指示岩浆-热液流体体系逐渐向氧化态过渡,有利于铜矿的形成。

岩体或角岩中黑云母的 Cu 含量并非铜矿石矿物的来源,只是起到了一定的指示作用。为探究黑云母对矿化的指示作用,笔者从黑云母的内在化学组成和 Cu、Mo 矿化量为基础,研究热液黑云母与对于孔深岩矿石的 Cu、Mo 矿化相关关系(表 3)。

对于热液黑云母样品,黑云母中 Cu 含量与黑云母 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值呈正相关($r = 0.55$),与对应孔深岩矿石的 Cu 含量呈正相关($r = 0.22$)。说明对于热液黑云母所在的岩矿石样品,其矿化强度与热液黑云母中 Cu 含量呈正相关,对成矿具有一定的指示意义。

表 3 黑云母特征值与黑云母样品、岩矿石样品的 Cu、Mo 含量对比统计表

Table 3 Statistics of characteristics value of biotites and Cu-, Mo-content of ores and biotites at the same depth

产状	样品编号	黑云母中 $w(\text{B})/\%$		对应岩矿石品位/ $\%$		$\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$
		CuO	MoO ₃	Cu	Mo	
A 类热液黑云母: 黑云母细脉	ZK2418-201.1-2	0	0.05	0.31	0.01	0.21
	ZK2417-532-2	0.10	0	0.18	0.04	0.40
	ZK2417-135.1-1	0.10	0.05	0.56	0.05	0.26
	ZK2417-208.2-1	0.05	0	0.51	0.01	0.19
	ZK2417-545.2-2	0.01	0	0.20	0.08	0.34
B 类热液黑云母: 石英 + 黑云母脉	ZK2417-760.1-1	0	0	0.14	0.03	0.13
	ZK2417-806.2	0.05	0	0.14	0.09	0.15
	ZK2418-423-1	0.01	0	0.15	0.04	0.15
	ZK2418-543.1	0	0	0.22	0.02	0.13
	ZK2418-749.1	0	0	0.16	0.03	0.11
	ZK2415-78.4-1	0.01	0.02	0.50	0.01	0.20
	ZK2410-124.1-2	0.01	0.04	0.40	0.01	0.13
	ZK2410-366.1-2	0.01	0.01	0.05	0.01	0.25
	ZK2417-329.1-2	0.01	0.05	0.35	0.02	0.19
C 类热液黑云母: 石英 + 绿泥石 + 黑云母脉	ZK2417-690.8-2	0.05	0.05	0.26	0.04	0.20
	ZK2410-62-1	0	0.08	0.10	0.01	0.24
	ZK2417-266.6-1	0	0.06	0.39	0	0.09
D 类热液黑云母: 石英 + 钠长石 + 黑云母脉	ZK2417-385.4-1	0	0	0.18	0.03	0.26
	ZK2418-388.4-1	0	0.02	0.17	0.03	0.21
	ZK2418-643-1	0	0.02	0.14	0.07	0.15
岩体中热液黑云母	ZK2413-200.5	0.25	0	0.27	0	0.34

注:岩、矿石样品中 Cu、Mo 元素的含量分析由西南冶金地质所完成。

6 结 论

本文在充分收集整理矿区地质资料和前人研究成果的基础上,立足于矿区最新的勘查成果,通过详细的地质调查和钻孔地质编录等,采用岩、矿石光薄片显微鉴定、电子探针分析等系统研究矿区黑云母特征,得出以下结论:

(1) 甲玛铜多金属矿床的黑云母主要赋存于岩体和角岩中,按成因又可分为原生黑云母(属于成矿前)和热液黑云母。

(2) 原生黑云母和热液黑云母落于黑云母分类图中富镁黑云母和金云母区域,岩体中的黑云母偏向于富镁黑云母,具有富镁特征。与原生黑云母相比,角岩中热液黑云母中 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CuO})$ 升高, $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 降低, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 分异程度增大;与原生黑云母相比,岩体中热液黑云母的 $w(\text{TiO}_2) < 3\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 15\%$, 可能具有低钛高铝的特征, $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 降低, $w(\text{MgO})$ 升高, $w(\text{CuO})$ 升高。五类热液黑云母化学成分没有明显的差别, D 类热液黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 较其他热液黑云母较低, 岩体中的热液黑云母 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 较其他热液黑云母偏高。

(3) 花岗斑岩中原生黑云母的结晶温度变化在 $730 \sim 750^\circ\text{C}$, $\log f(\text{O}_2)$ 较高(变化范围 $-13.0 \sim -11.5$, $\log f(\text{O}_2) > \text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$), 属于造山带钙碱性岩系, 具壳幔混源的成因特点。与原生黑云母相比, 角岩中热液黑云母 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值均一程度低, 且 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值相对含量显著升高, 甚至部分热液黑云母不含 Fe^{2+} , 指示岩浆-热液流体体系逐渐向氧化态过渡, 有利于斑岩矿床的形成。

(4) 对于热液黑云母所在的岩矿石样品, 矿化作用的强度与黑云母中 Cu 含量呈正相关, 对成矿具有一定的指示意义。

志 谢 本文在编写过程中得到项目团队的帮助和指导, 在此深表谢意! 感谢实验过程中得到长安大学刘民武老师的帮助。同时感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

References

Abdel-Rahman A M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alka-

line, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.

Al-Hashimi A R K and Brownlow A H. 1970. Copper content of biotites from the Boulder Batholith, Montana[J]. *Econ. Geol.*, 65(8): 985-992.

Beane R E. 1974. Biotite stability in the porphyry copper environment[J]. *Econ. Geol.*, 69(2): 241-256.

Bi X W, Hu R Z and Hanley J J. 2009. Crystallisation conditions (T , P , $f(\text{O}_2)$) from mineral chemistry of Cu- and Au- mineralised alkaline intrusions in the Red River-Jinshajiang alkaline igneous belt, western Yunnan Province, China[J]. *Mineralogy & Petrology*, 96: 43-58.

Cheng W B, Gu X X, Tang J X, Wang Li Q, Lü P R, Zhong K H, Liu X J and Gao Y M. 2010. Lead isotope characteristics of ore sulfides from typical deposits in the Gangdese-Nyainqentanglha metallogenic belt implications for the zonation of ore-forming elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3350-3362 (in Chinese with English abstract).

Cook S S. 1988. Supergene copper mineralization at the Lakeshore mine, Pinal County, Arizona[J]. *Econ. Geol.*, 83(2): 297-309.

Czamaske G K and Wones D R. 1973. Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo Area, Norway: Part 2, the mafic silicates[J]. *Journal of Petrology*, 14: 349-380.

De Albuquerque C A. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(7): 1779-1802.

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 & Technology Press. 82-113 (in Chinese).

Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *United States Geological Survey Professional Paper*, 354-B: 11-49.

Fu J B. 1981. Chemical composition of biotite in porphyry copper deposits[J]. *Geology and Prospecting*, (9): 16-19 (in Chinese).

Guo N, Guo K, Zhang T T, Liu T H, Hu B and Wang C W. 2012. Hydrothermal alteration distribution model of the Jiama (Gyama) copper-polymetallic deposit based on shortwave technique[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 641-653 (in Chinese with English abstract).

Henry D J, Guidotti C V and Thomsen J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J]. *American Mineralogist*, 90: 316-328.

Hong D W. 1982. Biotites and mineralogical facies from granitic rocks of South China and their relation to the series of mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 150-164 (in Chinese with English abstract).

- Hou Z Q, Qu X M, Huang W and Gao Y F. 2001. Gangdese porphyry copper belt is expected to become the second "Yulong" copper belt[J]. *Geology in China*, 28(10): 27-29(in Chinese with English abstract).
- Jacobs D C and Parry W T. 1976. A comparison of the geochemistry of biotite from some basin and range stocks[J]. *Econ. Geol.*, 71(6): 1029-1035.
- Jacobs D C and Parry W T. 1979. Geochemistry of biotite in the Santa Rita porphyry copper deposit, New Mexico[J]. *Econ. Geol.*, 74(4): 860-887.
- Jiang S Y, Ding T P, Wan D F and Wei J Y. 1992. Geochemistry of biotites and garnets from metamorphic rocks and discussion on metamorphism *P-T* conditions in Qing-Chengzi mining district[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 13(1): 71-84(in Chinese with English abstract).
- Kanisawa S. 1983. Chemical characteristics of biotites and hornblendes of Late Mesozoic to Early Tertiary granitic rocks in Japan [J]. *Geological Society of America Memoirs*, 159:129-134.
- Kesler S E, Issigonis M J, Brownlow A H, Damon P E, Moore W J, Northcote K E and Preto V A. 1975. Geochemistry of biotites from mineralized and barren intrusive systems[J]. *Econ. Geol.*, 70: 559-567.
- Li H L, Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Shuang Y, Li Z L, Li X M and Yuan S D. 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qitianling granite associated with the Furong tin deposit: Tracing tin mineralization signatures [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2605-2614(in Chinese with English abstract).
- Li J G, Wang Q H, Zheng M H, Zhou Z Y, Hu X Q, Yao P, Liu H F and Yang C Y. 2001. The controls of host basins on ore-forming elements from the SEDEX deposits in Xizang [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(4):12-20(in Chinese with English abstract).
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Vasconcelos P, Ma C Q, Deng X D, Souza Z, Zhao Y X and Wu G. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 43: 315-336.
- Li Y S, Lv Z C, Yan G S, Zhen S M and Du Z Z. 2012. Isotopic characteristics of S, Pb, H and O of Jiama copper-polymetallic ore deposit, Tibet and their significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4):72-81(in Chinese with English abstract).
- Lian Y, Xu W Y, Yang D, Chen W S, Qu X M and Chen D L. 2008. SR-XRF studies of fluid inclusions from the Jiama and Nanmu deposits in the Gangdise copper-polymetallic metallogenic belt of Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 185-198.
- Liang J X, Wang F X and Qiao L. 1995. Genetic evidence for the Xuefengian Sn-bearing biotite Granite in north Guangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 16(1):55-68(in Chinese with English abstract).
- Liu B, Ma C Q, Liu Y Y and Xiong F H. 2010. Mineral chemistry of biotites from the Tongshankou Cu-Mo deposit: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 151-165(in Chinese with English abstract).
- Liu S B and Wang L K. 1995. Advances in the research of copper in biotites from intrusive rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 14(3): 67-72(in Chinese with English abstract).
- Pan F C, Deng J, Yao P, Wang Q F and Liu Y X. 2002. The eruptive origins of copper and multimetal deposits in the skarns in Jiama, Tibet[J]. *Geoscience*, 16(4): 359-364(in Chinese with English abstract).
- Parry W T and Nackowski M P. 1963. Copper lead and zinc in biotites from Basin and Range quartz monzonites[J]. *Econ. Geol.*, 58(7): 1126-1144.
- Qin K Z, Zhang L C, Ding K S, Xu Y X, Tang D M, Xu X W, Ma T L and Li G M. 2009. Mineralization type, petrogenesis of ore-bearing intrusions and mineralogical characteristics of Sanchakou copper deposits in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 845-861(in Chinese with English abstract).
- Qin Z P. 2010. The diagenesis and mineralization of quasi-adakite in the Jiama copper polymetallic deposit (Master's degree thesis)[D]. Supervisor: Wang X W. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Qin Z P, Wang X W, Tang J X, Tang X Q, Zhou Y and Peng H J. 2011. Geochemical characteristics and their implications of peraluminous granite in the Jiama deposit, Tibet[J]. *Journal of Cheng Du University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(1): 76-84(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q and Huang W. 2001. Is Gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt [J]? *Mineral Deposits*, 20(4): 355-366(in Chinese with English abstract).
- Speer J A. 1987. Evolution of magmatic AFM mineral assemblages in granitoid rocks: The hornblende + melt = biotite reaction in the Liberty Hill pluton, South Carolina [J]. *American Mineralogist*, 72:9-10: 863-878.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens river area, northwest superior Province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455-470.
- 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 Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(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. Mineralogetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenic belt [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).

- Wang Q H, Wang B S, Li J G, Yao P, Li Z, Zhou Z Y, Cheng L J and Liu H F. 2002. Basic features and ore prospect evaluation of the Gangdisé island arc, Tibet, and its copper polymetallic ore belt[J]. Geological Bulletin of China, 21(1):36-40(in Chinese with English abstract).
- Wang W P, Tang J X and Ying L J. 2012. Mineral chemical characteristics of biotites from hornfels in the Jiama(Gyama) polymetallic copper deposit of Tibet and their geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4): 444-458(in Chinese with English abstract).
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. American Mineralogist, 50: 1228-1272.
- Wones D R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks[J]. American Mineralogist, 74: 744-749.
- Xiong X L, Shi M Q and Chen F R. 2001. Biotite as a tracer of Cu and Au mineralization in hypogene-subvolcanic plutons[J]. Mineral Deposits, 21(2): 107-111(in Chinese with English abstract).
- Yang M Z. 1964. The alteration of hydrothermal biotite in disseminated molybdenum deposits, eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 44(2): 191-212(in Chinese with English abstract).
- Yao P, Zheng M H, Peng Y M, Li J G, Su D K and Fan W Y. 2002. Sources of ore-forming materials and the genesis of the Jiama copper and polymetallic deposit in Gangdisé island-arc belt, Xizang[J]. Geological Review, 48(5): 468-479(in Chinese with English abstract).
- Yavuz F. 2003a. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: I-definitions and structure of the computer program MICA+ [J]. Computers & Geosciences, 29(10): 1203-1213.
- Yavuz F. 2003b. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: Part II-Applications using the computer program Mica+ [J]. Computers & Geosciences, 29(10): 1215-1228.
- 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 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, 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, Wang C H, Tang J X, Wang D H, Qu W J and Li C. 2014. Re-Os systematics of sulfides (chalcopyrite, bornite, pyrite and pyrrhotite) from the Jima Cu-Mo deposit of Tibet, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 497-506.
- Zheng Q R. 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EMPA data[J]. Acta Mineralogica Sinica, (1): 55-62(in Chinese with English abstract).
- Zheng W B, Chen Y C, Song X, Tang J X, Ying L J, Li F J and Tang X Q. 2010. Element distribution and geological significance in the Jiama copper polymetallic deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 29(5): 775-784 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W B. 2012. The study on metallogenic model and prospecting pattern for Jiama polymetallic copper deposit, Tibet (Doctoral dissertation) [D]. Supervisor: Chen Y C. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Wang X W, Tang J X, Qin Z P, Peng H J, Li A G, Yang K, Wang H, Li J and Zhang J C. 2011. 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).
- Zhou Z X. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2(1): 59-70 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程文斌, 顾雪祥, 唐菊兴, 王立强, 吕鹏瑞, 钟康惠, 刘晓吉, 高一鸣. 2010. 西藏冈底斯-念青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征——对成矿元素组合分带性的指示[J]. 岩石学报, 26(11):3350-3362.
- 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏. 1998. 喷流成因矽卡岩与成矿以西藏甲玛铜多金属矿床为例[M]. 成都:四川科技出版社. 123-132.
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. 地质与勘探, 9(1): 16-19.
- 郭娜, 郭科, 张婷婷, 刘廷晗, 胡斌, 汪重午. 2012. 基于短波红外勘查技术的西藏甲玛铜多金属矿热液蚀变矿物分布模型研究[J]. 地球学报, 33(4): 641-653.
- 洪大卫. 1982. 华南花岗岩的黑云母和矿物相及其与矿化系列的关系[J]. 地质学报, (2): 149-164.
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 中国地质, 28(10): 27-29.
- 蒋少涌, 丁悌平, 万德芳, 魏菊英. 1992. 青城子矿区黑云母和石榴石的地球化学及变质作用的 $P-T$ 条件探讨[J]. 地球学报, 13(1):71-84.
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 双燕, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成及其对锡成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 23(10):2605-2614.
- 李金高, 王全海, 郑明华, 周祖耀, 胡晓强, 姚鹏, 刘鸿飞, 杨成玉. 2001. 西藏 SEDEX 型矿床赋矿盆地性质对成矿元素的制约作用[J]. 沉积与特提斯地质, 21(4):12-20.
- 李永胜, 吕志成, 严光生, 甄世民, 杜泽忠. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床 S、Pb、H、O 同位素特征及其指示意义[J]. 地学前缘, 19(4): 72-81.

- 连玉, 徐文艺, 杨丹, 杨丹, 陈伟湿, 曲小明, 陈栋梁. 2008. 西藏冈底斯甲马和南木矿床流体包裹体 SR-XRF 研究[J]. 岩石矿物学杂志, 27(3):186-196.
- 梁祥济, 王福生, 乔莉. 1995. 桂北雪峰期含锡黑云母花岗岩成因的见证[J]. 地球学报, 16(1):55-68.
- 刘彬, 马昌前, 刘园园, 熊富浩. 2010. 鄂东南铜山口铜(钼)矿床黑云母矿物化学特征及其对岩石成因与成矿的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2):151-165.
- 柳少波, 王联魁. 1995. 侵入体中黑云母含铜性研究[J]. 地质科技情报, 14(3): 67-71.
- 潘凤雏, 邓军, 姚鹏, 王庆飞, 刘玉祥. 2002. 西藏甲马铜多金属矿床矽卡岩的喷流成因[J]. 现代地质, 16(4): 360-364.
- 秦克章, 张连昌, 丁奎首, 许英霞, 唐冬梅, 徐兴旺, 马天林, 李光明. 2009. 东天山三岔口铜矿床类型、赋矿岩石成因与矿床矿物学特征[J]. 岩石学报, 25(4):845-861.
- 秦志鹏. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床似埃达克岩的成岩成矿作用(硕士学位论文)[D]. 导师: 汪雄武. 成都: 成都理工大学.
- 秦志鹏, 汪雄武, 唐菊兴, 唐晓倩, 周云, 彭慧娟. 2011. 西藏甲玛过铝质花岗岩的地球化学特征及成因意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 76-84.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带:西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 矿床地质, 20(4):356-364.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫估, 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, 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.
- 王全海, 王保生, 李金高, 姚鹏, 李志, 周祖翼, 程力军, 刘鸿飞. 2002. 西藏冈底斯岛弧及其铜多金属矿带的基本特征与远景评估[J]. 地质通报, 21(1): 35-40.
- 王威平, 唐菊兴, 应立娟. 2012. 甲玛铜多金属矿床角岩中黑云母矿物化学特征及其地质意义[J]. 地球学报, 33(4): 444-458.
- 熊小林, 石满全, 陈繁荣. 2001. 浅成-次火山岩黑云母 Cu, Au 成矿示踪意义[J]. 矿床地质, 21(2):107-111.
- 杨敏之. 1964. 我国东北甲区钼矿化有关热液蚀变黑云母的物理化学性质及其成因[J]. 地质学报, 44(2): 191-212.
- 姚鹏, 郑明华, 李金高, 彭勇明, 栗登奎, 范文玉. 2002. 西藏冈底斯岛弧带甲马铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究[J]. 地质论评, 48(5): 469-478.
- 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, 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.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 3(1): 55-62.
- 郑文宝, 陈毓川, 宋鑫, 唐菊兴, 应立娟, 黎枫估, 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. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿模式与找矿模型(博士学位论文)[D]. 导师: 陈毓川. 成都: 成都理工大学.
- 周云, 汪雄武, 唐菊兴, 秦志鹏, 彭慧娟, 李爱国, 杨王华, 李炯, 张继超. 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.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59-70.