

# 江西武山铜矿黑云母的化学成分特征： 地质与成矿意义

张三衡<sup>1,2</sup>, 李武显<sup>1\*</sup>, 周贤旭<sup>3</sup>, 杨东生<sup>4</sup>, 吕璞良<sup>5</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江西省 地质矿产勘查开发局 赣西北大队, 江西 九江 332000; 4. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 5. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

**摘要:** 华南燕山期岩浆活动频繁, 出露有大量的斑岩侵入体, 形成了许多与斑岩侵入体有关的铜多金属矿床。对九瑞矿集区与铜矿有关的武山岩体黑云母矿物进行了详细的镜下观察和电子探针分析。依据镜下岩相学特征可以将研究的黑云母分为斑晶黑云母和基质黑云母两类, 两类黑云母成分上均为镁质黑云母, 并且大部分斑晶黑云母受到热液蚀变的影响, 已经具有蚀变黑云母的特征。黑云母 Ti 温度计显示斑晶黑云母的核部结晶温度平均值为 744 °C, 边部温度平均值为 742 °C, 基质黑云母结晶温度平均值为 732 °C。黑云母压力计显示斑晶黑云母的侵位深度平均值为 3.3 km, 基质黑云母的侵位深度平均值为 2.6 km。利用黑云母成分反映出的岩浆为高氧逸度岩浆, 有利于成矿。研究表明, 大多数武山岩体的斑晶黑云母受到热液作用的影响, 其 TFeO、Na<sub>2</sub>O、MnO 和 TiO<sub>2</sub> 等含量显著降低。这些黑云母在成分上更可能反映的是浅部岩浆房受到来自深部的中基性岩浆注入、脱水, 并诱发中酸性岩浆上侵形成斑岩的作用过程。利用黑云母成分特征, 可以大致判断武山铜矿的剥蚀程度。

**关键词:** 黑云母; 花岗闪长斑岩; 武山铜矿; 九瑞地区; 江西省

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2020)06-0637-16

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2020.06.005

## Chemical composition of biotite from Wushan copper deposit, Jiangxi Province: Geology and metallogenic significances

ZHANG San-heng<sup>1,2</sup>, LI Wu-xian<sup>1\*</sup>, ZHOU Xian-xu<sup>3</sup>, YANG Dong-sheng<sup>4</sup> and LÜ Pu-liang<sup>5</sup>

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Northwestern Jiangxi Geological Party, Bureau of Exploration and Development of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province, Jiujiang 332000, China;
4. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
5. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

**Abstract:** Yanshanian magmatic activity was widespread in South China, and a large number of Yanshanian-aged porphyry intrusions are exposed in the Jiurui region, with many polymetallic copper deposits related to these porphyry intrusions. This paper presents the detailed mineral composition of biotite from the Wushan copper deposit in the Jiurui ore concentration area. According to their microscopic petrographic characteristics, the biotites of the Wushan copper deposit can be divided into two types: biotite phenocrysts and matrix biotite. Detailed EPMA analyses of the two types show they are all magnesium biotite, with most phenocrysts exhibiting

收稿日期(Received): 2019-03-05; 改回日期(Revised): 2019-03-29; 接受日期(Accepted): 2019-04-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600204); 中国地质调查局整装勘查项目(12120114034701)

作者简介: 张三衡(1992-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: zhangsanheng@sina.com

\* 通讯作者(Corresponding author): LI Wu-xian, E-mail: liwx@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290225

hydrothermal alteration. The biotite Ti thermometer returned average crystallization temperatures of 744 °C for the phenocryst cores, 742 °C for the phenocryst rims, and 732 °C for matrix biotite. The biotite phenocrysts yielded an average emplacement depth of 3.3 km, and the matrix biotite had an average depth of 2.6 km. The biotite composition indicates that the source magma likely had high oxygen fugacity, which is conducive to porphyry mineralization. The biotites in the Wushan copper deposit have been affected by hydrothermal fluids, resulting in a significant decrease in TFeO, Na<sub>2</sub>O, MnO, and TiO<sub>2</sub>. The composition of biotite phenocrysts records the magmatic processes that formed the Wushan intrusion. A shallow magma chamber was dehydrated by the intrusion of intermediate-basic magma, following which the magma upwelled and intruded into the shallow crust to form a porphyry. The approximate degree of denudation of the Wushan copper deposit can be determined based on the biotite composition.

**Key words:** biotite; granodiorite porphyry; Wushan copper deposit; Jiurui region; Jiangxi Province

## 0 引言

斑岩型铜矿(包括与斑岩型有关的夕卡岩型铜矿)的形成与岩浆活动密切相关。斑岩型铜矿与成矿有直接成因联系的火成岩主要是花岗闪长斑岩,黑云母是花岗闪长斑岩中常见的镁铁质矿物。黑云母的化学成分明显受母岩浆成分以及岩浆冷却结晶时的物理化学条件(氧逸度、温度和压力等)控制<sup>[1]</sup>,因此其化学成分可以反映矿物结晶时的物理化学条件。对黑云母矿物成分进行详细研究,可以得到与成矿有关的火成岩形成时的温度、压力以及氧逸度等信息。与成矿有关的热液成因的黑云母成分特征也可以反映岩浆后期的热液活动情况,指示成矿性的好坏。因此,与斑岩型铜矿有关的黑云母研究是斑岩铜矿成因和成矿性研究的重要内容<sup>[2-4]</sup>。

长江中下游成矿带是我国重要的铜矿产地,江西九江-瑞昌地区(简称九瑞地区)是长江中下游成矿带西部重要的铜多金属成矿区。九瑞铜多金属成矿区的重要矿床包括武山铜矿和城门山铜矿,以及东雷湾铜矿等。九瑞成矿区前人已经分别从岩石化学组成、矿物成分、同位素组成、流体包裹体特征、岩体定年和成矿年龄等方面进行研究<sup>[5-10]</sup>。目前的研究多集中在矿床学方面,但系统的与成矿有关岩体的矿物学研究相对薄弱,缺少与其他斑岩矿床的数据对比,为此本文对本区代表性铜矿-武山铜矿开展系统的黑云母矿物学研究,以期了解铜矿形成时岩浆房中岩浆性质及其岩浆作用过程的信息。

## 1 矿床地质概况

武山铜矿位于江西北部的九江-瑞昌(九瑞)地区,

扬子板块北缘、下扬子断裂拗陷带西段,属横立山-黄桥向斜东段北翼,是长江中下游成矿带中的重要矿床<sup>[11]</sup>。九瑞地区曾经历过长期多旋回构造运动,其中燕山旋回所伴随的岩浆活动是本区内生铜金矿床形成的关键条件之一。本区燕山期火成岩以同熔型中酸性侵入岩为主,多期次侵位的众多岩体构成同一火成岩系统<sup>[12]</sup>。前人对武山矿床进行过许多研究,认为该矿床的形成与中酸性花岗闪长斑岩体有关,由岩体向外依次形成夕卡岩型铜矿、块状硫化物型铜矿<sup>[13]</sup>。矿体可分为两部分:层状矿体分布于矿区北部,称为北矿带;夕卡岩矿体分布于矿区南部,称为南矿带。矿区断裂比较发育,主要有NEE、NW和NNE三组,其中以NEE向断裂最为发育,并控制了区内主要岩脉的位置。与成矿关系密切的花岗闪长斑岩体位于矿区南部,呈岩株状侵入到二叠系-三叠系碳酸盐岩地层中,岩体平面分布为近椭圆形,剖面上呈喇叭状向SE倾斜,露头面积约0.6 km<sup>2</sup><sup>[5]</sup>(图1)。南矿带夕卡岩矿体沿花岗闪长斑岩体与围岩的接触带分布,矿石矿物组成比较复杂,其中金属矿物以黄铁矿为主,其次为少量的黄铜矿、磁铁矿、方铅矿和闪锌矿等,脉石矿物主要有石英、方解石和石榴子石等。Cu品位平均为1.04%。围岩蚀变类型主要为夕卡岩化,其次为硅化、绢云母化、钾化和碳酸盐化等<sup>[15]</sup>。关于武山铜矿花岗闪长斑岩体的年龄,丁昕等<sup>[16]</sup>利用SIMS锆石U-Pb年代学方法测得两期年龄,分别为(121.0±2.5) Ma和(144.6±3.9) Ma,代表了燕山中期花岗质岩浆的侵入年龄。Li *et al.*<sup>[17]</sup>用SIMS锆石U-Pb法测定的两个样品年龄结果一致,分别为(146.0±1.0) Ma和(146.6±1.0) Ma,代表了燕山中期花岗质岩浆的侵入年龄。成矿年龄方面,李进文等<sup>[11]</sup>采用辉钨矿Re-Os定年方法获得武山铜矿南矿带等时线年龄为

(146.4±2.6) Ma, 与花岗闪长斑岩成岩年龄一致, 表明成岩成矿是同时的。

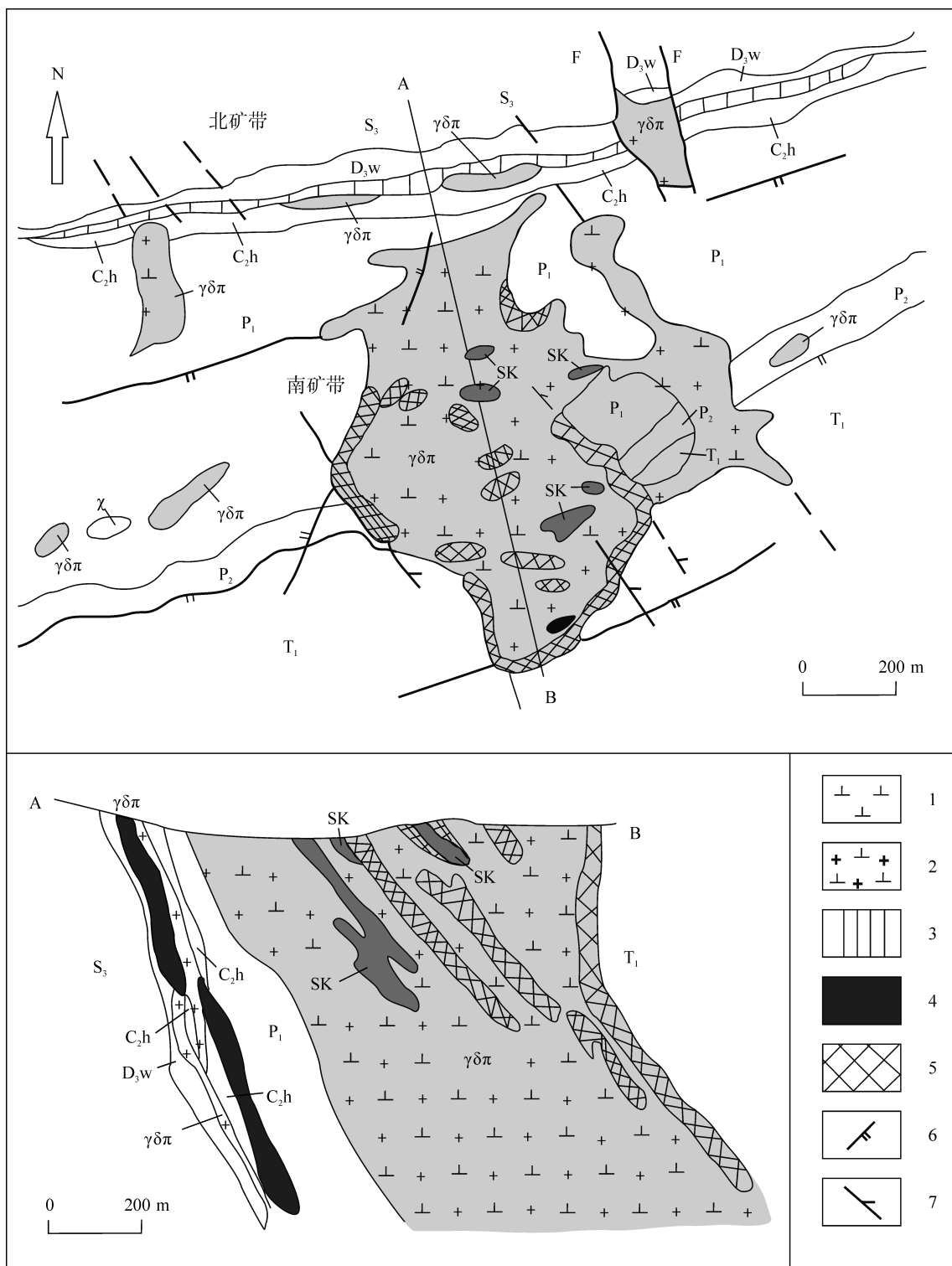


图 1 武山铜矿地质图(修改自文献[14])

Fig.1 Geological map of the Wushan copper deposit (modified from reference [14])

T<sub>1</sub>-下三叠统; P<sub>2</sub>-上三叠统; P<sub>1</sub>-下二叠统; C<sub>2h</sub>-中石炭统; D<sub>3w</sub>-上泥盆统; S<sub>3</sub>-上志留统; χ-煌斑岩; SK-夕卡岩; 1-石英闪长斑岩; 2-花岗闪长斑岩; 3-铁帽; 4-层状含铜黄铁矿; 5-夕卡岩型铜矿体; 6-压扭性断层; 7-张扭性断层

## 2 样品特征及分析方法

本次研究的样品取自武山铜矿钻孔岩芯, 所采样品均为花岗闪长斑岩, 岩石手标本呈灰色至灰褐色, 斑状结构, 块状构造。岩石主要斑晶矿物有石英、斜长石、角闪石和黑云母; 基质多为微晶矿物, 其矿物组成主要为石英、斜长石和角闪石等; 副矿物主要为磷灰石、榍石、铁钛氧化物等。样品中黑云母含量(体积分数) 5%~10%, 部分样品黑云母含量低于5%。显微镜下的岩相学观察表明本区黑云母可以分为斑晶黑云母和基质黑云母两类。斑晶黑云母绝大部分显示原生的岩浆黑云母特征, 少部分显示蚀变黑云母特征, 颜色多为棕色, 斑晶粒径大小不一, 大部分在 500~1000  $\mu\text{m}$  之间, 自形-半自行结构, 形状为片状及四边形颗粒状等, 部分颗粒状黑云母斑晶中包裹有磷灰石, 在镜下可以观察到部分斑晶的边部与硬石膏接触在一起(图 2a、2b 和 2c)。基质黑云母大部分显示蚀变黑云母的特征, 颜色多为深褐色, 粒径多在 200  $\mu\text{m}$  以下, 多为他形结构, 形状为长条状, 多呈聚集体分布。部分样品发现含有硬石膏, 形状不规则, 多呈现出近似颗粒状或长条状, 弥散分布在基质之中, 常常与基质黑云母共生(图 2d、2e 和 2f)。分析的样品均为新鲜的花岗闪长斑岩和蚀变花岗闪长斑岩。从岩相和蚀变矿物组合分析, 蚀变的样品应该属于较高温钾化带。在显微镜下挑选出代表性的斑晶和基质黑云母样品进行电子探针分析, 在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 采用的仪器为 JEOL-JXA8100 型电子探针, 仪器工作条件为: 工作电压 15 kV, 工作电流 20 nA, 束斑直径 2  $\mu\text{m}$ , 大部分元素的峰位时间 20 s, 标样采用美国 SPI 公司的硅酸盐矿物和氧化物标样, 数值校正采用 ZAF 方法。

## 3 黑云母化学成分特征

我们对不同类型黑云母共分析了 92 个数据点,  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  采用林文薇等(1994)的方法计算得到<sup>[18]</sup>, 结果见表 1。基于黑云母的岩相学特征, 将黑云母分为斑晶和基质两种类型, 其化学成分(表 1)具有以下特征。

斑晶黑云母核部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 11.80%~14.87%

之间, 平均值为 13.65%, 边部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 12.49%~14.34%之间, 平均值为 13.37%; 基质黑云母  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 12.81%~15.56%之间, 平均值为 13.69%。斑晶黑云母核部  $\text{MgO}$  含量在 12.42%~17.72%之间, 平均值为 14.70%, 边部  $\text{MgO}$  含量在 13.42%~17.13%之间, 平均值为 15.23%; 基质黑云母  $\text{MgO}$  含量在 13.12%~18.53%之间, 平均值为 15.03%; 斑晶黑云母核部  $\text{K}_2\text{O}$  含量在 6.34%~9.65%之间, 平均值为 9.31%, 边部  $\text{K}_2\text{O}$  含量在 7.20%~9.68%之间, 平均值为 9.12%, 基质黑云母  $\text{K}_2\text{O}$  含量在 6.95%~9.73%之间, 平均值为 9.03%; 斑晶黑云母核部  $\text{TiO}_2$  含量在 2.25%~4.53%之间, 平均值为 3.95%。边部  $\text{TiO}_2$  含量在 2.99%~4.67%之间, 平均值为 3.78%。基质黑云母  $\text{TiO}_2$  含量在 2.46%~4.70%之间, 平均值为 3.54%; 斑晶黑云母核部  $\text{TFeO}$  含量在 12.31%~18.02%之间, 平均值为 16.00%, 边部  $\text{TFeO}$  含量在 12.41%~18.21%之间, 平均值为 15.39%, 基质黑云母  $\text{TFeO}$  含量在 12.76%~17.97%之间, 平均值为 15.70%; 相对斑晶黑云母而言, 基质黑云母整体上具有高铝、高镁、低钾、低钛的特点。

在  $\text{Mg}-(\text{Fe}^{3+}+\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Ti})-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$  三角图中(图 3a), 本文所有黑云母分析点部落在了镁质黑云母区域内, 表明本区黑云母的成分类型为镁质黑云母。2005 年 Nachit *et al.*<sup>[20]</sup> 认为用  $\text{TiO}_2\text{-FeO}^*\text{-MgO}$  ( $\text{FeO}^* = \text{TFeO} + \text{MnO}$ ) 三角分类图解可以较好地地区分岩浆黑云母、重结晶黑云母和新生黑云母(图 3b)。两类黑云母在图上的分布基本一致, 绝大部分落在重结晶黑云母区域, 少部分落在岩浆黑云母区域。1994 年马昌前等<sup>[21]</sup> 总结了大量的黑云母数据, 提出黑云母的 Ti 值(单位分子阳离子数(atoms per formula unit))和  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值可以用来区分火成和变质/交代黑云母, 认为岩浆成因黑云母的 Ti 值介于 0.22~0.55 之间,  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值范围为 0.30~0.55。退变质和交代成因黑云母的 Ti 值小于 0.2, 而进变质黑云母的 Ti 值变化较大,  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值多大于 0.55。本区所有黑云母的  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值均大于 0.55, 类似于进变质黑云母。

本文收集整理了大量已发表的黑云母数据(由于岩浆黑云母成分明显受到岩浆成分的影响, 因此收集的岩浆黑云母数据来自与斑岩铜矿有关, 但不成矿的钙碱性花岗质岩体, 而蚀变黑云母数据则来自与斑岩型矿床有关的岩体不同蚀变带), 并与本次研究的黑云母数据进行了对比。已有的研究表明, 与

斑岩铜矿有关的火成岩和蚀变带中的黑云母的成分有明显的差别, 其中最主要的差别表现在  $\text{TiO}_2$  含量, 通常岩浆黑云母的  $\text{TiO}_2$  含量大于 4%, 随着蚀变带逐渐向低温过渡,  $\text{TiO}_2$  含量逐渐降低。这是因为  $\text{TiO}_2$  进入黑云母晶格的能力与黑云母结晶温度呈正相关关系<sup>[20]</sup>。MgO 和 TFeO 在不同类型的黑云母中也有明显的成分变化<sup>[20,22-24]</sup>, 但是它们同时也明显受到黑云母结晶时岩浆成分变化的影响, 因此难以

分清楚是受岩浆成分变化的影响还是不同黑云母类型的差异。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、MnO、 $\text{SiO}_2$  和 Cl 在热液中属于活动或交代替换组分, 它们对流体作用比较敏感, 研究表明这几个组分的含量在不同的蚀变带中也有较大的变化<sup>[22-24]</sup>, 为此, 我们利用  $\text{TiO}_2$  对主要氧化物  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、MnO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 TFeO, 以及 Cl 作图(图 4), 结果显示岩浆黑云母和钾化带黑云母、绢英岩化带黑云母成分具有较明显的成分差异。

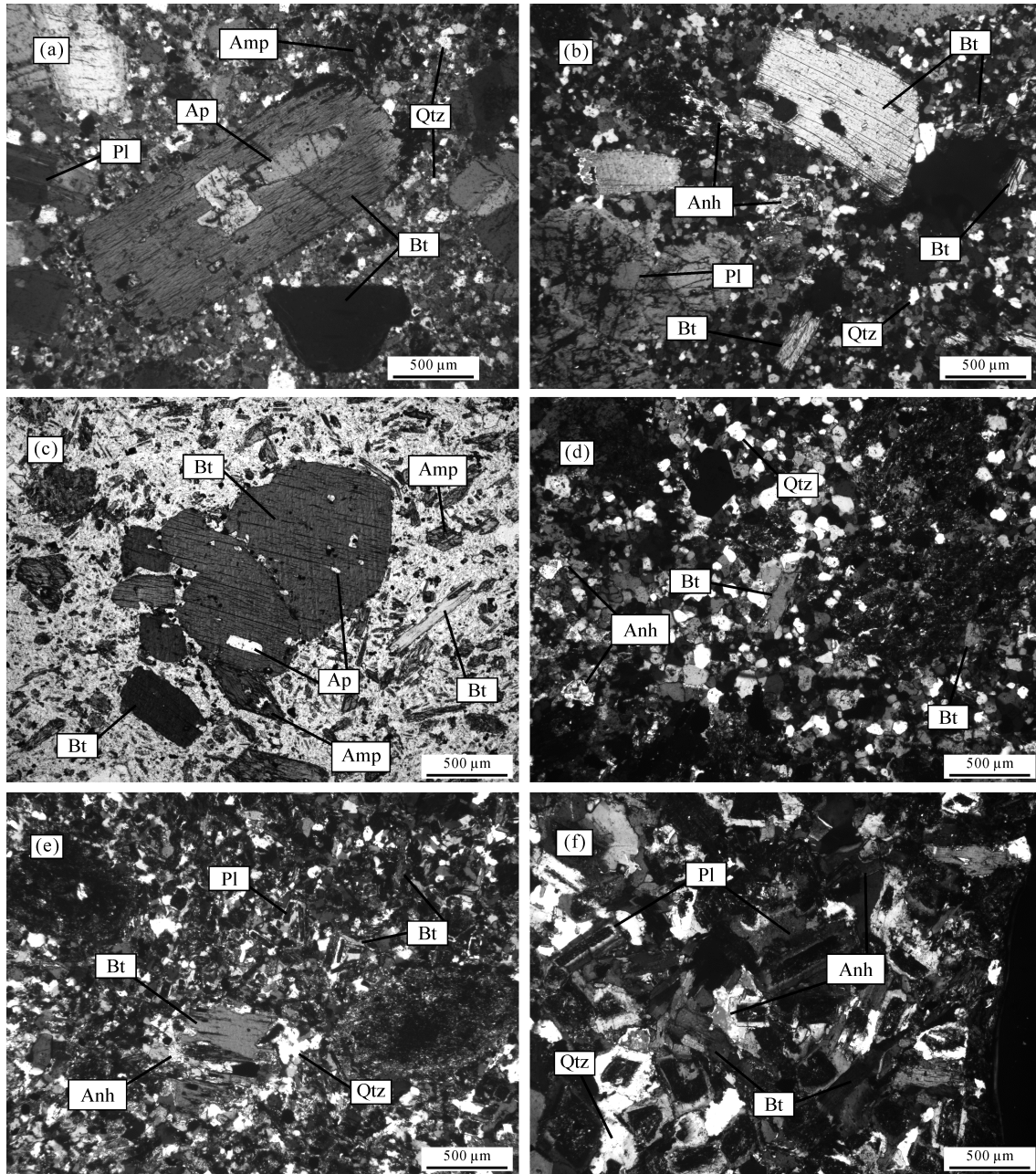


图 2 武山铜矿黑云母岩相照片

Fig.2 Microscopic photos of biotite samples from the Wushan copper deposit

(a) 斑晶黑云母(正交偏光); (b) 斑晶黑云母边部与硬石膏接触, 发生蚀变(正交偏光); (c) 斑晶黑云母颗粒中包裹磷灰石(单偏光); (d) 基质黑云母(正交偏光)呈现长条状; (e) 基质黑云母呈聚集体与硬石膏接触, 斑晶黑云母与硬石膏接触部位呈现破碎状(正交偏光); (f) 基质黑云母与硬石膏接触(正交偏光)。Bt-黑云母; Pl-斜长石; Qtz-石英; Amp-角闪石; Anh-硬石膏; Ap-磷灰石

表1 武山岩体黑云母电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of biotites from the Wushan rock mass

样号	ZKS202-10C	ZKS452-9B	ZKS801-4B	ZKS801-4C	ZKS1553-14C1	ZKS1553-14C2	ZKS1553-14D	ZKS3551-1A	ZKS301-10	ZKS401-4	ZKS401-21	ZKS401-22
结构	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶	斑晶
分析数 $n$	5	2	3	4	2	1	1	1	11	11	9	8
SiO <sub>2</sub>	37.78	39.23	37.89	36.96	37.24	36.60	38.34	38.68	36.71	37.36	37.08	37.83
TiO <sub>2</sub>	3.66	3.78	3.70	3.19	3.32	3.88	2.25	3.66	3.98	4.07	4.21	4.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.70	12.90	12.79	13.27	13.11	12.74	14.87	12.81	13.81	13.86	13.64	14.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.18	0.08	0.11	0.45	0.04	2.22	0.85	0.45	0.08	0.09	0.12	0.19
TFeO	15.66	12.36	15.74	15.31	17.88	18.02	14.21	14.94	16.70	15.28	16.79	14.98
MnO	0.16	0.10	0.16	0.17	0.29	0.32	0.22	0.18	0.15	0.14	0.19	0.13
MgO	14.37	17.42	14.40	15.29	13.51	12.42	14.63	15.42	14.30	15.59	14.25	15.40
CaO	0.07	0.01	0.02	0.08	0.00	0.19	0.32	0.05	0.02	0.14	0.01	0.01
BaO	0.38	0.64	0.47	0.45	0.53	0.83	0.27	0.35	0.45	0.26	0.46	0.37
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.13	0.17	0.10	0.12	0.13	0.12	0.23	0.20	0.27	0.17	0.19
K <sub>2</sub> O	9.18	9.65	9.51	8.43	9.02	8.79	6.34	9.47	9.45	9.34	9.44	9.36
Cl	0.13	0.08	0.10	0.14	0.15	0.13	0.13	0.15	0.13	0.15	0.15	0.12
F	0.63	0.92	0.78	0.70	0.61	0.53	0.78	1.02	bdl	bdl	bdl	bdl
合计	96.07	97.29	95.82	94.52	95.80	96.80	93.31	97.40	95.99	96.55	96.51	96.75

以 22 个氧为基准计算的离子数

<sup>IV</sup> Si	5.66	5.70	5.69	5.59	5.64	5.54	5.73	5.68	5.54	5.55	5.56	5.59
<sup>IV</sup> Al	2.34	2.30	2.31	2.41	2.36	2.46	2.27	2.32	2.46	2.45	2.44	2.41
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
<sup>VI</sup> Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04
Ti	0.41	0.41	0.42	0.36	0.38	0.44	0.25	0.40	0.45	0.45	0.47	0.46
Cr	0.14	0.01	0.01	0.05	0.00	0.27	0.10	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02
Fe <sup>3+</sup>	0.52	0.54	0.51	0.53	0.48	0.53	0.92	0.56	0.31	0.32	0.35	0.39
Fe <sup>2+</sup>	1.46	0.97	1.47	1.42	1.79	1.80	0.86	1.29	1.80	1.58	1.76	1.47
Mn	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	3.21	3.77	3.22	3.45	3.05	2.80	3.26	3.37	3.22	3.45	3.19	3.39
Y-site	5.64	5.61	5.60	5.78	5.72	5.65	5.77	5.58	5.79	5.80	5.78	5.77
Ca	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.05	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
Ba	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
Na	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.07	0.06	0.08	0.05	0.05
K	1.75	1.79	1.82	1.63	1.74	1.70	1.21	1.77	1.82	1.77	1.81	1.76
X-site	1.84	1.86	1.90	1.70	1.81	1.82	1.31	1.87	1.91	1.88	1.88	1.84
OH <sup>-</sup>	3.67	3.56	3.61	3.63	3.67	3.71	3.60	3.49	3.97	3.96	3.96	3.97
Cl	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03
F	0.30	0.42	0.37	0.33	0.29	0.25	0.37	0.47	bdl	bdl	bdl	bdl
Mg/(Mg+Fe)	0.62	0.72	0.62	0.64	0.57	0.55	0.65	0.65	0.60	0.64	0.60	0.65
$t$ (°C)	735.00	762.00	737.00	723.00	711.00	727.28	673.61	739.98	742.66	754.20	748.46	755.23
$p$ (100 MPa)	0.57	0.44	0.48	0.76	0.61	0.91	1.41	0.51	0.96	0.92	0.87	0.88

(续表 1)

样号	ZKS401-25	ZKS401-25	ZKS202-10C	ZKS801-4C	ZKS1553-14C1	ZKS1553-14C2	ZKS3551-1A	ZKS301-10	ZKS401-4	ZKS401-21	ZKS401-22	ZKS401-25
结构	斑晶	基质	基质	基质	基质	基质	基质	基质	基质	基质	基质	基质
分析数 $n$	7	4	3	1	2	1	1	2	1	5	4	3
SiO <sub>2</sub>	37.11	37.47	38.82	37.65	36.84	37.30	37.54	36.53	37.03	37.58	38.67	37.49
TiO <sub>2</sub>	4.19	3.32	3.28	3.33	3.09	3.07	3.40	4.04	4.24	3.66	3.80	3.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.87	14.06	13.00	12.81	13.19	12.84	12.95	13.65	13.69	13.81	14.36	14.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.35	0.25	0.07	0.05	1.08	0.17	0.05	0.10	0.30	0.12	0.25
TFeO	16.51	15.46	14.35	16.00	17.77	17.39	17.25	17.40	15.08	15.70	14.29	15.80
MnO	0.15	0.17	0.13	0.23	0.22	0.28	0.31	0.19	0.17	0.19	0.10	0.14
MgO	14.43	14.98	15.64	14.28	14.36	13.12	14.04	13.91	15.36	15.40	16.18	14.67
CaO	0.00	0.03	0.06	0.01	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.00
BaO	0.36	0.22	0.32	0.36	0.38	0.35	0.49	0.27	0.09	0.29	0.23	0.39
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.09	0.12	0.09	0.09	0.24	0.21	0.09	0.31	0.15	0.12	0.07
K <sub>2</sub> O	9.45	9.18	8.96	9.37	8.06	9.18	8.85	9.06	9.42	8.95	9.03	9.43
Cl	0.11	0.10	0.11	0.17	0.19	0.25	0.16	0.13	0.15	0.14	0.10	0.10
F	bdl	bdl	0.79	0.70	0.59	0.60	0.86	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
合计	96.41	95.42	95.82	95.08	94.86	95.74	96.26	95.34	95.67	96.19	97.04	95.92
以 22 个氧为基准计算的离子数												
<sup>iv</sup> Si	5.55	5.62	5.75	5.70	5.60	5.66	5.64	5.55	5.55	5.59	5.64	5.61
<sup>iv</sup> Al	2.45	2.38	2.25	2.30	2.40	2.34	2.36	2.45	2.45	2.41	2.36	2.39
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
<sup>vi</sup> Al	0.01	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	0.09
Ti	0.47	0.37	0.36	0.38	0.35	0.35	0.38	0.46	0.48	0.41	0.42	0.40
Cr	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0.13	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.03
Fe <sup>3+</sup>	0.35	0.38	0.60	0.50	0.52	0.47	0.53	0.36	0.31	0.38	0.46	0.37
Fe <sup>2+</sup>	1.72	1.57	1.18	1.53	1.74	1.76	1.64	1.85	1.58	1.58	1.29	1.61
Mn	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Mg	3.22	3.35	3.45	3.22	3.26	2.97	3.14	3.15	3.43	3.41	3.52	3.27
Y-site	5.79	5.83	5.65	5.64	5.87	5.65	5.69	5.84	5.79	5.86	5.81	5.79
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Ba	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
Na	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.06	0.03	0.09	0.04	0.03	0.02
K	1.80	1.76	1.69	1.81	1.56	1.78	1.70	1.75	1.80	1.70	1.68	1.80
X-site	1.87	1.80	1.75	1.86	1.61	1.88	1.79	1.80	1.90	1.77	1.73	1.85
OH	3.97	3.98	3.60	3.62	3.67	3.65	3.55	3.97	3.96	3.97	3.98	3.97
Cl	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
F	bdl	bdl	0.37	0.34	0.28	0.29	0.41	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Mg/(Mg+Fe)	0.61	0.63	0.66	0.61	0.59	0.57	0.59	0.59	0.64	0.63	0.67	0.62
$t$ (°C)	749.65	725.73	729.30	722.65	706.90	700.91	718.73	741.96	760.10	735.12	748.66	732.33
$p$ (100 MPa)	0.90	1.00	0.43	0.45	0.73	0.56	0.62	0.91	0.91	0.87	0.95	0.96

注: bdl—低于检测限; T-site 为硅氧四面体层中阳离子数; Y-site 为八面体层中阳离子数; X-site 为云母结构层中大阳离子数

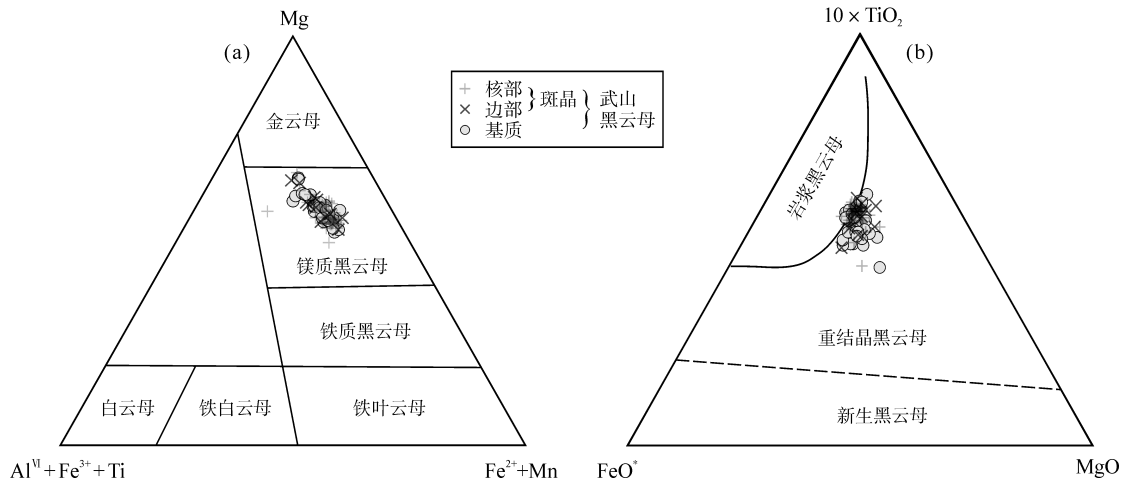


图3 黑云母分类图(a, 底图据文献[19])和不同黑云母类型图(b, 底图据文献[20])

Fig.3 Mg-(Al<sup>IV</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn) classification diagram (a, after reference [19]) and TiO<sub>2</sub>-FeO<sup>\*</sup>-MgO classification diagram for the Wushan biotite (b, after reference [20])  
FeO<sup>\*</sup> = TFeO + MnO

其中岩浆黑云母和钾化带黑云母的成分总体上接近, 都有较高的 TiO<sub>2</sub> 含量<sup>[29]</sup> (TiO<sub>2</sub> > 3%), 但是在 Na<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> 图解上两者略有差异, 岩浆黑云母的成分变化比较小, 分布区呈近似上下长条形分布, 在钾化带黑云母中, Na<sub>2</sub>O 含量低的黑云母明显 TiO<sub>2</sub> 偏低, 呈现向左上开口的马鞍形(图 4a)。绢英岩化带黑云母与岩浆黑云母和钾化带黑云母成分上有明显的成分差异(图 4), 具有低的 TiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 和 MnO, 略高的 SiO<sub>2</sub>, 以及变化较大的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFeO 和 Cl 的特点。基于上述不同类型黑云母的成分, 可以大致划分出岩浆黑云母、钾化带黑云母和绢英岩化带黑云母(含热液黑云母)三个区(图 5)。把武山岩体不同类型的黑云母投影到上述图解中, 可以看到斑晶黑云母的核部主要投影在岩浆黑云母区, 具有高 TiO<sub>2</sub> (> 3%)和变化的 Na<sub>2</sub>O (0.1%~0.4%)特点, 呈近似纵向长条形分布。斑晶黑云母的边部具有较高的 TiO<sub>2</sub> 含量(> 3%), 但是 Na<sub>2</sub>O 含量较低(0.05%~0.3%)。基质黑云母也具有较高的 TiO<sub>2</sub> 含量(多大于 3%), 但是 Na<sub>2</sub>O 含量较低, 总体呈横向分布, 类似于绢英岩化带黑云母, 但是与之相比有更高的 TiO<sub>2</sub> 含量(图 5a)。在 TiO<sub>2</sub> 对其他氧化物 SiO<sub>2</sub>、MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TFeO, 以及 Cl 图解上, 两类黑云母没有明显的差别, 但是总体上斑晶黑云母核部更多落在岩浆黑云母区, 斑晶黑云母边部和基质黑云母更多落在钾化带黑云母区, 这与镜下岩相学的观察相一致, 即蚀变相当于钾化带蚀变<sup>[30]</sup>。

黑云母的成分与 MgO 含量呈正相关关系(图 4h), 并且岩浆黑云母的成分比蚀变黑云母

的更为集中, 这也指示了后期蚀变作用会增加黑云母中的 MgO 含量。与岩浆黑云母相比, 蚀变带黑云母的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 均明显呈现出更加分散的特征(图 4e), 显示出这些元素在蚀变过程中的活动性。从图 4g 中可以看到 MgO 含量与 TFeO 含量存在明显的负相关关系, 岩浆黑云母的成分明显高于绢英岩化带黑云母, 且岩浆黑云母的成分分布明显比绢英岩化带黑云母更加集中, 指示与成矿作用有关的蚀变作用会降低黑云母的成分。岩浆黑云母具有高铁低镁的特点, 表明黑云母在结晶过程中, 发生了 Mg 和 Fe 之间的置换。本区黑云母的成分明显介于岩浆黑云母和蚀变黑云母之间, 而且分布范围比岩浆黑云母大, 比蚀变黑云母小(图 5b、5d 和 5f), 处于岩浆黑云母向蚀变黑云母的过渡区。在显微镜下观察到硬石膏的存在, 部分黑云母斑晶与热液硬石膏呈现接触关系(图 2b 和 2d), 且样品采自与斑岩型铜矿有关的花岗闪长斑岩体, 岩体受到热液活动的影响比较大, 结合图 5 可知本区大部分黑云母, 尤其是与硬石膏呈接触关系的黑云母, 已经转变为蚀变黑云母。

## 4 讨论

### 4.1 黑云母结晶温度与压力

温度是矿物结晶时的重要参数。实验表明, 黑云母中的 Ti 含量对于温度非常敏感, 因此可以利用 Ti 含量估算黑云母的结晶温度。Henry *et al.*<sup>[30]</sup> 搜集大量的黑云母成分数据, 总结提出了一个计算黑云



母结晶温度的经验公式：

$$t = ((\ln Ti + 2.3549 + 1.7283 (x_{Mg})^3)/b)^{0.33}$$

式中： $t$  为摄氏温度； $Ti$  为按照 22 个氧原子为单位计算阳离子后的原子数； $x_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$ ； $b = 4.6482 \times 10^{-9}$ ；其中  $x_{Mg} = 0.275 \sim 1.000$ ， $Ti = 0.04 \sim 0.60$ ， $t = 480 \sim 800$  °C。本区黑云母的  $x_{Mg}$  和  $Ti$  符合计算要求。经过计算，本区斑晶黑云母的结晶温度范围在 711~760 °C 之间，平均值为 745 °C，其中黑云母斑晶

核部的温度在 674~760 °C 之间，平均温度为 744 °C，边部温度在 696~773 °C 之间，平均温度为 742 °C。该温度低于浅部岩浆房可喷发的岩浆温度，即岩浆房中岩浆的结晶度大于 50%，对应的温度约为 770 °C<sup>[31]</sup>，基质黑云母的结晶温度范围在 699~780 °C 之间，平均温度为 732 °C。基质黑云母的平均温度比斑晶黑云母略低。在  $Ti-Mg/(Mg+Fe)$  图解(图 6a)中，基质黑云母的分布范围比斑晶黑云母的略低。与长江中下游

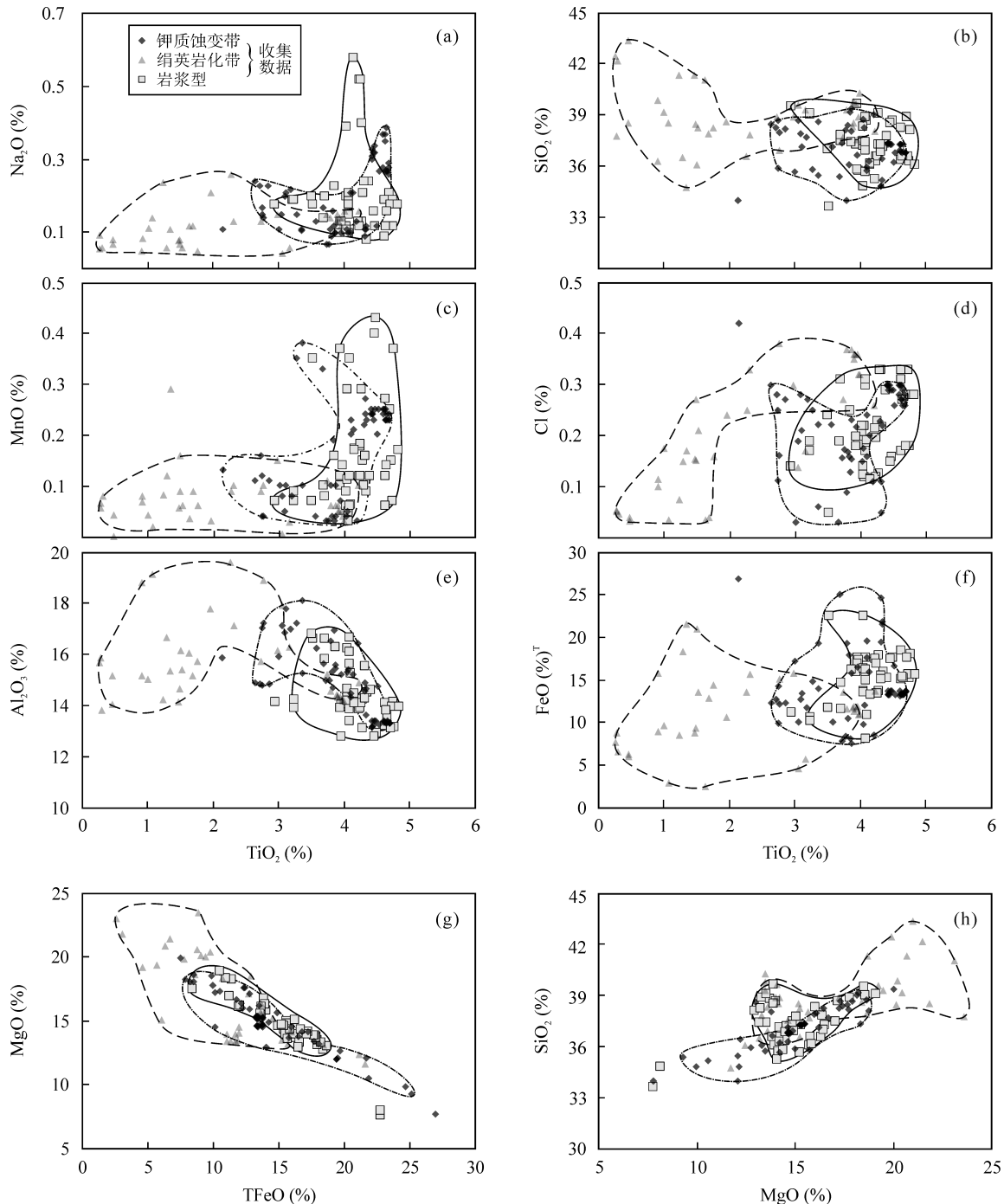


图 4 黑云母化学成分图(数据引自[3,4,22,24-28])

Fig.4 Chemical composition diagram of biotite from various locations (data from references [3,4,22,24-28])

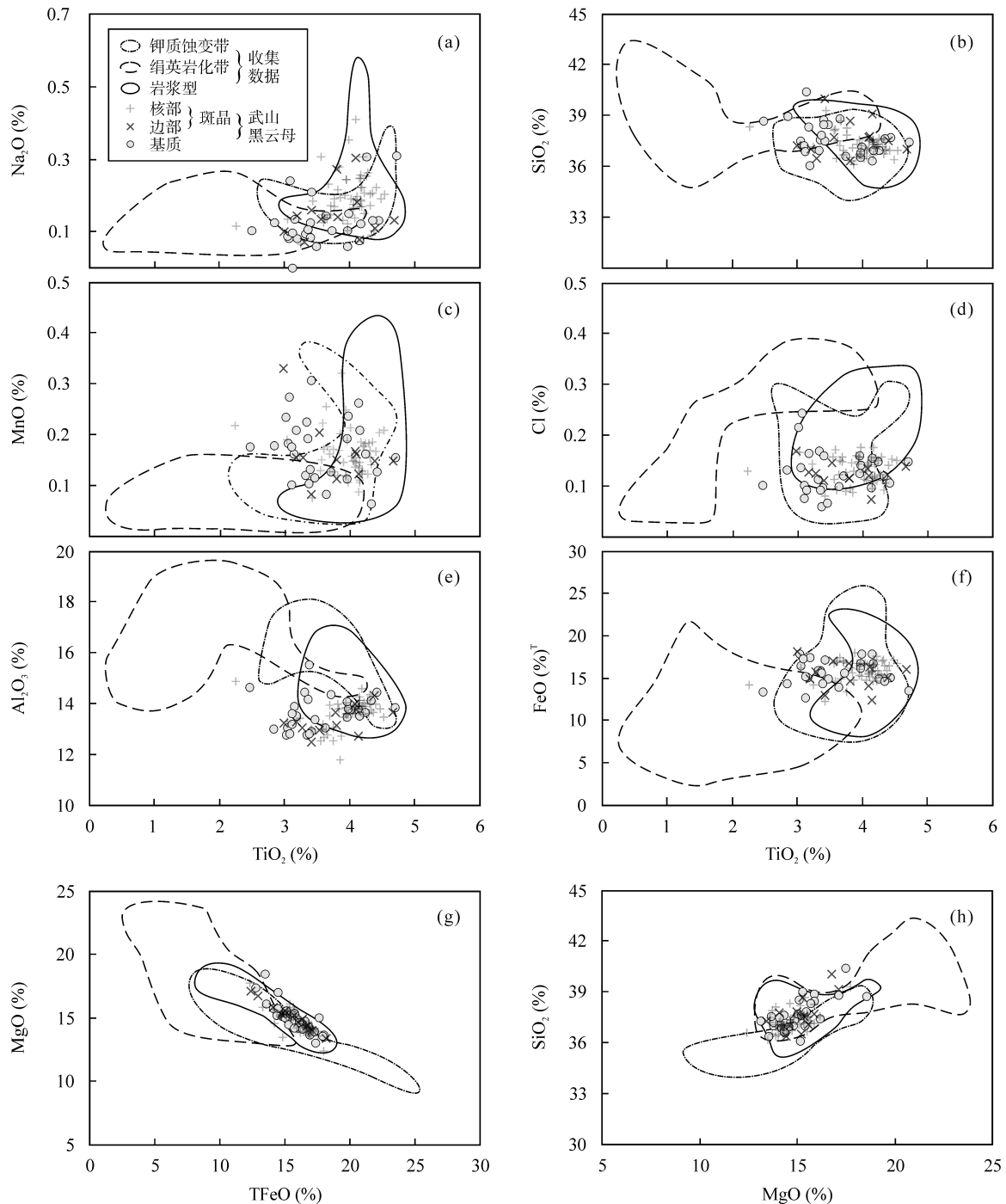


图5 武山铜矿黑云母化学成分协变图

Fig.5 Chemical composition diagram of biotite from the Wushan copper deposit

地区其他铜矿岩体的黑云母温度基本一致,如江西德兴铜厂斑岩铜矿黑云母温度计计算的平均温度为752 °C<sup>[27]</sup>,安徽铜陵凤凰山铜矿黑云母温度计计算的平均温度为744 °C<sup>[28]</sup>。

尽管黑云母不是最适合计算压力的矿物,但是在缺乏角闪石的岩石中,黑云母也可以用于估算压力。2010年 Uchida *et al.*<sup>[33]</sup>研究表明,黑云母中的全

铝含量与花岗岩的固结压力有较好的正相关性,可以用全铝含量估算岩浆固结压力,从而进一步估算侵位深度,计算公式为:

$$p (100 \text{ MPa}) = 3.03 \times {}^{\text{T}}\text{Al} - 6.53 (\pm 0.33).$$

式中: <sup>T</sup>Al 是以 22 个氧原子为基础计算的黑云母中铝阳离子总数。可以得到斑晶黑云母的核部结晶压力为 38~120 MPa, 平均值为 87 MPa, 基质黑云母的

结晶压力为 40~104 MPa, 平均值为 68 MPa, 取地壳密度平均值  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 利用压力计算公式  $p = \rho gh$ , 对其进行简单的计算, 可以得到: 黑云母斑晶核部对应的侵位深度为  $h \approx 1.40 \sim 4.50 \text{ km}$ , 平均深度为 3.30 km, 基质对应的侵位深度为  $h \approx 1.50 \sim 3.90 \text{ km}$ , 平均深度为 2.60 km, 尽管两者的压力差值在公式误差范围内, 但是两者的结晶压力还是存在一定的系统差别, 很可能反映两种黑云母结晶于不同的压力条件下, 斑晶黑云母结晶于浅部岩浆房, 而基质黑云母更可能结晶于斑岩最终侵位和流体交代过程中。整体而言, 黑云母压力计所反映出来的侵位深度位于浅部地壳, 是斑岩型矿床浅部富矿岩浆房系统的理想深度<sup>[34]</sup>。

#### 4.2 氧逸度

氧逸度是影响岩浆过程的一个重要参数, 对于斑岩型铜矿而言, 成矿岩浆的氧逸度是一个重要的指示成矿性好坏的指标。1965 年 Wones *et al.*<sup>[32]</sup> 研究发现, 随着岩浆氧逸度的增加, 镁铁质矿物的  $x_{\text{Mg}}$  也会增加, 并且提出了一个用黑云母成分估算氧逸度的图解( $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ 图解)。后人利用该图解做了大量关于氧逸度的工作, 本文也利用该图解估算了武山铜矿火成岩的氧逸度。如图 6b 所示, 总体而言研究区的岩浆黑云母氧逸度分布比较集中, 只有一个斑晶黑云母的数据落在了  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (HM) 缓冲线之上, 其余的都落在了 Ni-NiO (NNO)-HM 缓冲线之间, 且有向着 Mg 方向延伸的趋势, 这与本区黑云

母为镁质黑云母相对应, 且基质黑云母有着向 HM 缓冲线方向增加的趋势。2016 年唐攀等<sup>[35]</sup> 研究甲玛斑岩铜多金属矿床时, 利用黑云母氧逸度计来研究岩浆-热液的演化过程, 并认为岩浆向热液演化过程中氧逸度增高, 岩浆阶段氧逸度缓冲剂为 NNO, 至热液阶段缓冲剂为 HM, 由此可知本区的黑云母成分指示的氧逸度特征有利于斑岩系统成矿的。

#### 4.3 斑晶黑云母化学特征对岩浆房过程的制约

斑岩铜矿形成的最重要的特征之一是成矿岩体具有高的水(流体)含量<sup>[36-37]</sup>。尽管在一些细节上有不同的划分方案, 但是基本上依据斑岩铜矿的岩浆体系在不同深度的演化, 将其分为深部岩浆分异过程(深部岩浆房, 通常发育在壳幔过渡带)、岩浆饱和过程和成矿物质富集过程(浅部岩浆房, 通常为 5~15 km)以及成矿物质沉淀就位(成矿斑岩系统, 通常为 3~5 km)四个过程<sup>[38-39]</sup>。岩相学划分的斑晶黑云母和基质黑云母分别结晶在浅部岩浆房和成矿斑岩系统中, 因此黑云母的岩相学和化学成分特征也可以反映浅部岩浆房和成矿斑岩的岩浆动力学过程, 尤其是黑云母斑晶, 可以与斜长石斑晶一样反映浅部岩浆房的动力学过程。由于黑云母是含水矿物, 对流体的活动比斜长石更加敏感。近年来越来越多的研究表明, 斑岩铜矿系统浅部岩浆房的作用过程对斑岩成矿的制约<sup>[40]</sup>, 有关斑岩成矿的一个重要问题是什么原因触发了浅部岩浆房的不稳定, 促进了浅部岩浆房的富流体含矿岩浆上侵并脱流体, 最终

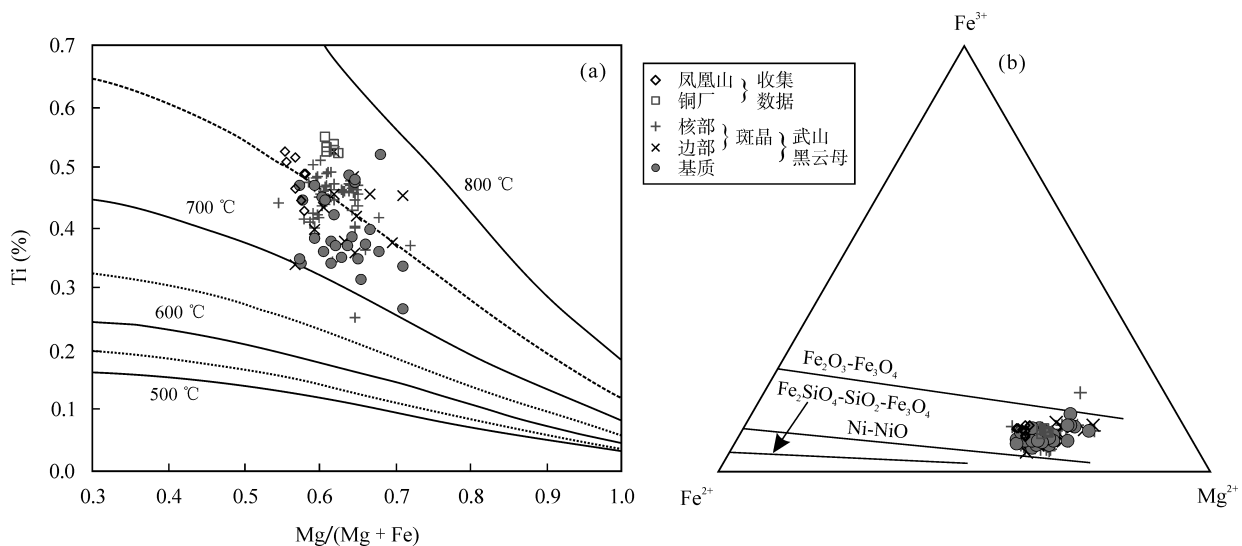


图 6 黑云母 Ti-Mg/(Mg+Fe)等温线图(a, 底图据文献[30])和黑云母  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ 图解(b, 底图据文献[32])

Fig.6 Ti-Mg/(Mg+Fe) temperature isotherm diagram (a, after reference [30]) and  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  diagram for the Wushan biotite (b, after reference [32])

形成斑岩并成矿的<sup>[40-41]</sup>。越来越多的研究表明,来自深部基性岩浆向浅部岩浆房的侵入,不但为浅部岩浆房提供了物质(包括成矿物质)和热,由于这些深部富水岩浆的减压和去水作用,也为浅部岩浆房带来了大量的流体和伴随这些流体出溶的成矿物质(如 Cu、Au 和 Mo 等金属元素)。更重要的是基性岩浆的侵入触发了浅部岩浆房中岩浆的上侵,形成斑岩株和铜矿床<sup>[31]</sup>。大量的斜长石斑晶的研究揭示了浅部岩浆房的岩浆作用过程。但是,斑晶黑云母是否能够反映岩浆房的作用过程目前的研究还较少。本文对武山铜矿成矿岩体黑云母化学成分的系统研究表明,尽管斑晶黑云母在岩相上具有明显的岩浆黑云母的特征,但是这些黑云母的化学成分与高温蚀变的钾化带黑云母在很大程度上重合,反映出受到过流体交代作用的化学特点,这在斑晶黑云母的边部表现得更为明显。实际上,本文研究的大多数斑晶黑云母边部与钾化带黑云母(与硬石膏共生的蚀变黑云母)的化学成分基本一致,支持这些斑晶黑云母在浅部岩浆房中经历了流体的交代作用。化学成分上,斑晶黑云母的边部比核部更富 MgO (核部 MgO = 14.61%; 边部 MgO = 15.11%), 更贫 F (核部 F = 0.72%; 边部 F = 0.71%), 这与成矿蚀变的特点相反,成矿蚀变常常造成蚀变黑云母更贫 MgO 和富 F, 这是因为蚀变是低温浅部中酸性岩浆中释放的流体,这种流体成分上贫 MgO、富 F<sup>[23]</sup>。因此,本文研究的斑晶黑云母成分特征是深部基性岩浆侵入释放的流体或者富镁的成分共同作用的结果,因此在成分分类投影中落入重结晶黑云母区,更可能反映的是浅部岩浆房的岩浆作用过程,即基性岩浆对浅部岩浆房的侵入,脱水,并触发浅部岩浆房中酸性岩浆更大比例的熔融,形成可喷发的岩浆,随后上侵形成斑岩,并脱水成矿。

#### 4.4 武山铜矿黑云母特征对判断剥蚀深度的制约

斑岩铜矿具有稳定且一致的蚀变分带,已有研究建立的斑岩铜矿蚀变带包括核部钾质蚀变带 (potassic zone), 其外包裹青磐岩化带 (propylitic zone), 青磐岩化带上面是绢英岩化带 (phyllitic zone) 和高级泥化带 (advanced argillic zone)<sup>[36]</sup>。斑岩铜矿矿体主要赋存在钾化带或钾化带外部,这是因为斑岩铜矿中的成矿物质多以络合物的形式迁移沉淀,在成矿过程的钾化阶段析出磁铁矿,导致流体中聚集大量的  $S^{2-}$  离子,易于与 Cu 等亲硫元素结合成硫

化物并发生沉淀成矿<sup>[36,38,42]</sup>。成矿斑岩系统的剥蚀深度是斑岩铜矿保存是否完好的重要标志,也是斑岩铜矿找矿和矿床评价的重要指标。由于不同蚀变带中黑云母的化学成分有较明显的差异,因此利用黑云母成分可以大致判断斑岩成矿系统的剥蚀深度。确定蚀变带对于了解矿体的保存和剥蚀条件有重要的意义,也是预测是否存在隐伏矿体的一个重要指标。正如前述,研究的所有黑云母都落在岩浆黑云母和钾化带黑云母区,表明目前武山铜矿保留的蚀变带已经主要是钾化带,其上部的绢英岩化带和高级泥化带已经被剥蚀掉。

#### 4.5 岩石成因及成矿意义

黑云母的化学成分变化很大程度上受其物质来源性质的影响。因此,黑云母成分可能反映岩浆的源区性质、成因类型和构造背景等特征<sup>[43]</sup>。1994年 Abdel-Rahman<sup>[44]</sup>统计了世界各地的 325 个黑云母成分数据,提出了 MgO-TFeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解,利用统计学分析表明 89%~95% 的数据都正确地落在了分类范围中,表明黑云母成分可以清楚地反映寄主岩浆的性质。在图 7a 中,本区黑云母落在了造山带钙碱性区域,且向着 MgO 方向延伸,江西德兴铜厂和安徽铜陵凤凰山铜矿两者也都落在造山带钙碱性区域,而在图 7b 中,黑云母大部分落在壳幔混合区,只有 5 个数据落在了幔源区,江西德兴铜厂和安徽凤凰山铜矿两者都落在壳幔混合区。2008 年蒋少涌等<sup>[5]</sup>根据元素和同位素地球化学特征认为武山岩体是强烈的壳幔相互作用的产物。2016 年杨波等<sup>[46]</sup>研究江西德兴铜矿田中的朱砂红斑岩铜矿时指出,该铜矿田内的 3 个矿床(富家坞矿床、铜厂矿床和朱砂红矿床)的铅同位素总体显示出壳幔混合铅的特征。本次黑云母成分研究得到的认识与前人的研究成果相一致,符合长江中下游地区矿床岩浆活动特点<sup>[47]</sup>。

2009 年秦克章等<sup>[48]</sup>认为黑云母是斑岩铜矿及其他热液铜矿中重要的成矿指示矿物,黑云母化的强弱与铜矿化强度有直接的正相关关系。研究表明,与成矿有关的黑云母多富镁而低铁, Mg/Fe 比值一般大于 0.5, TiO<sub>2</sub> 含量多大于 3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量多小于 15%, 矿化黑云母以高钾低钠和钙为特点, CaO 含量小于 0.5%, K/Na 比值多大于 10。而同类非矿化岩石中的黑云母的 Mg/Fe 比值则小于 0.5<sup>[24]</sup>, TiO<sub>2</sub> 小于 3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量大于 15%。本次研究的黑云母除了一个分析数据的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 大于 15%, CaO 大于 0.5% 之外,

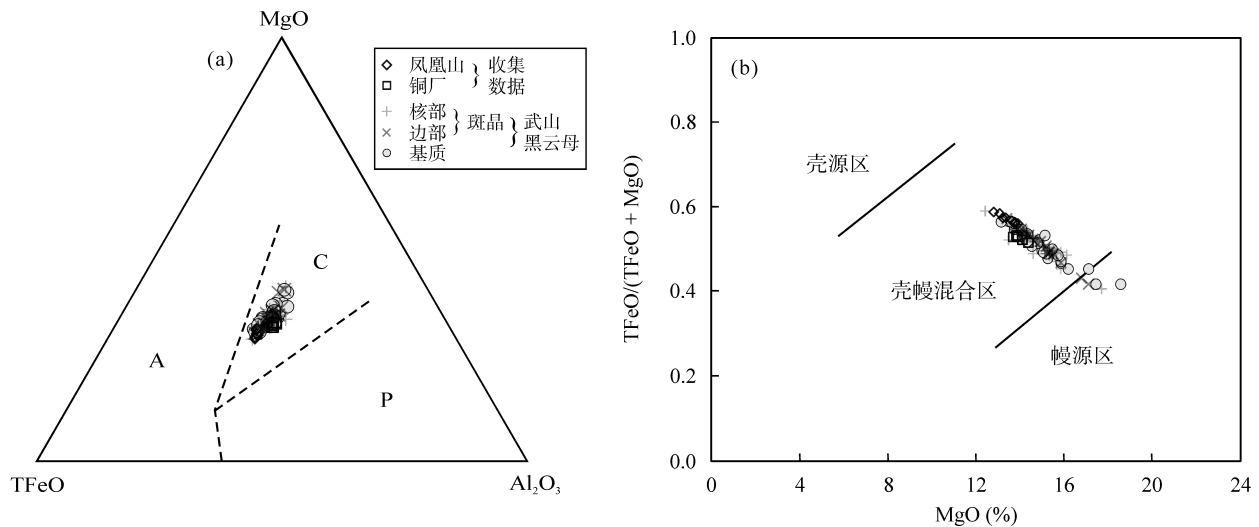


图 7 黑云母 MgO-TFeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解(a, 底图据文献[44])和黑云母 TFeO/(TFeO+MgO)-MgO 图解(b, 底图据文献[45])  
Fig.7 MgO-TFeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram (a, after reference [44]), and TFeO/(TFeO+MgO)-MgO diagram for the Wushan biotite (b, after reference [45])

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)  
A-anorogenic alkaline suites; C-calc-alkaline orogenic suites; P-peraluminous (including S-type) suites

其余结果均落在有利于矿化的范围内, 并且 Mg/Fe 大于 0.5, K/Na 大于 10, 指示本区岩浆活动具有良好的成矿性。

## 5 结 论

(1) 武山岩体黑云母为镁质黑云母, 包括自形-半自行斑晶和他形的基质, 基质多呈聚集体分布; 相对于斑晶黑云母而言, 基质黑云母整体上具有高铝、高镁和低钾、低钛的特点。

(2) 武山岩体黑云母受到热液蚀变作用的影响, 与岩浆黑云母相比, 其 TFeO、Na<sub>2</sub>O、MnO 和 TiO<sub>2</sub> 等主成分显著降低。

(3) 武山岩体斑晶黑云母在成分上更可能反映的是浅部岩浆房受到中基性岩浆侵入脱水、中酸性岩浆上侵形成斑岩岩浆的作用过程。

(4) 武山岩体的黑云母反映出的温度、压力、氧逸度等都显示出有利于斑岩成矿性的特点, 寄主岩浆来源于壳幔混合区, 符合长江中下游地区矿床岩浆活动特点。

野外样品的采集工作得到了岑涛博士的帮助; 电子探针分析工作得到了陈林丽工程师的帮助; 两位审稿人提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

### 参考文献(References):

- [1] 弥佳茹, 袁顺达, 原娅斌, 轩一撒. 湘南宝山矿床花岗闪长斑岩中黑云母的矿物学特征及其指示意义[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1357-1365.
- [2] Mi Jia-ru, Yuan Shun-da, Yuan Ya-bin, Xuan Yi-sa. Mineral chemistry of biotites in Baoshan granodiorite-porphyry, southern Hunan Province: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(6): 1357-1365 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ayati F, Yavuz F, Noghreyan M, Haroni A. Chemical characteristics and composition of hydrothermal biotite from the Dalli porphyry copper prospect, Arak, central province of Iran[J]. Mineral Petrol, 2008, 94(1/2): 107-122.
- [4] Parsapoor A, Khalili M, Tepley F, Maghami M. Mineral chemistry and isotopic composition of magmatic, re-equilibrated and hydrothermal biotites from Darreh-Zar porphyry copper deposit, Kerman (Southeast of Iran)[J]. Ore Geol Rev, 2015, 66: 200-218.
- [5] Zhang W, Lentz D R, Thorne K G, Mcfarlane C. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W-Mo-Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems[J]. Ore Geol Rev, 2016, 77: 82-96.
- [6] 蒋少涌, 李亮, 朱碧, 丁昕, 姜耀辉, 顾连兴, 倪培. 江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1679-1690.
- Jiang Shao-yong, Li Liang, Zhu Bi, Ding Xin, Jiang Yao-hui, Gu Lian-xing, Ni Pei. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granodiorite from the Wushan copper deposit, Jiangxi Province and their implications for petrogenesis[J]. Acta Petrol Sinica, 2008, 24(8): 1679-1690 (in Chinese with English abstract).
- [6] 东前, 杜杨松, 曹毅, 庞振山, 宋林旭, 郑震. 江西武山花岗闪长斑岩中黑云母成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 2011, 31(2): 1-6.
- Dong Qian, Du Yang-song, Cao Yi, Pang Zhen-shan, Song Lin-xu, Zheng Zhen. Compositional characteristics of biotites

- in Wushan granodiorite, Jiangxi Province: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Mineral Petrol, 2011, 31(2): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 曾勇, 匡福祥, 贺振宇, 柯学, 余明刚, 赵希林, 张勇. 长江中下游成矿带九瑞矿集区(北部)含矿岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1146-1158.
- Chen Zhi-hong, Xing Guang-fu, Guo Kun-yi, Zeng Yong, Kuang Fu-xiang, He Zhen-yu, Ke Xu, Yu Ming-gang, Zhao Xi-lin, Zhang Yong. Zircon U-Pb ages of ore-bearing granitic bodies in northern Jiujiang-Ruichang metallogenic district of the mineralization belt of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, and its geological significance[J]. Acta Geol Sinica, 2011, 85(7): 1146-1158 (in Chinese with English abstract).
- [8] 徐耀明, 蒋少涌, 朱志勇, 周巍, 孔凡斌, 孙明志, 熊永根. 江西九瑞矿集区成矿与未成矿中酸性侵入岩年代学、岩石化学、矿物化学特征的异同及地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4291-4310.
- Xu Yao-ming, Jiang Shao-yong, Zhu Zhi-yong, Zhou Wei, Kong Fan-bin, Sun Ming-zhi, Xiong Yong-gen. Geochronology, geochemistry and mineralogy of ore-bearing and ore-barren intermediate-acid intrusive rocks from the Jiurui ore district, Jiangxi Province and their geological implications[J]. Acta Petrol Sinica, 2013, 29(12): 4291-4310 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴德新, 赵元艺, 吕立娜, 许虹, 郭硕, 刘妍, 朱小云, 王增科, 水新芳. 江西德兴朱砂红斑岩铜矿流体包裹体特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 677-690.
- Wu De-xin, Zhao Yuan-yi, Lü Li-na, Xu Hong, Guo Shuo, Liu Yan, Zhu Xiao-yun, Wang Zeng-ke, Shui Xin-fang. Fluid inclusion characteristic of the Zhushahong porphyry copper deposit in Dexing, Jiangxi Province, and its metallogenic significance[J]. Acta Petrol Sinica, 2013, 87(5): 677-690 (in Chinese with English abstract).
- [10] 贾丽琼, 杨丹, 徐文艺, 吕庆田, 杨竹森, 莫宣学, 王梁. 江西九瑞地区东雷湾砂卡岩型铜多金属矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 2015, 36(2): 177-186.
- Jia Li-qiong, Yang Dan, Xu Wen-yi, Lü Qing-tian, Yang Zhu-sen, Mo Xuan-xue, Wang Liang. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dongleiwan skarn Cu polymetallic deposit in the Jiujiang-Ruichang ore concentration area of Jiangxi Province and its geological significance[J]. Acta Geosci Sinica, 2015, 36(2): 177-186 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 臧文栓. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 801-807.
- Li Jin-wen, Li Xu-hui, Pei Rong-fu, Mei Yan-xiong, Wang Yong-lei, Qū Wen-jun, Huang Xiu-bao, Zang Wen-shuan. Re-Os age of molybdenite from the southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 81(6): 801-807 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吕新彪, 姚书振, 周宗桂. 江西九瑞地区岩浆岩系统与成矿[J]. 华南地质与矿产, 1997, 13(1): 27-36.
- Lǚ Xin-biao, Yao Shu-zhen, Zhou Zong-gui. Magmatic rock system and metallogenesis in Jiurui region, Jiangxi Province[J]. Geol Mineral Resour South China, 1997, 13(1): 27-36 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐唐光. 江西武山铜矿床控矿因素及找矿方向[J]. 金属矿山, 2007(9): 76-78.
- Xu Tang-guang. Ore-controlling factor of Jiangxi Wushan copper deposit and ore-prospecting orientation[J]. Metall Mine, 2007(9): 76-78 (in Chinese with English abstract).
- [14] 崔彬, 杨明银, 詹朝阳. 武山铜矿北矿带黄铁矿的成因矿物学研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(5): 44-48.
- Cui Bin, Yang Ming-yin, Zhan Chao-yang. Research genetic mineralogy of pyrite for north ore zone of Wushan copper deposit[J]. Geol Explor, 2002, 38(5): 44-48 (in Chinese with English abstract).
- [15] 孔凡斌, 蒋少涌, 徐耀明, 朱志勇, 钱汉东, 边立赠. 江西武山铜矿床海底喷流与岩浆热液叠加成矿作用: 控矿地质条件、矿石结构构造与矿床地球化学制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3929-3937.
- Kong Fan-bin, Jiang Shao-yong, Xu Yao-ming, Zhu Zhi-yong, Qian Han-dong, Bian Li-zeng. Submarine hydrothermal exhalation with superimposed magmatic-hydrothermal mineralization in the Wushan copper deposit, Jiangxi Province: Constraints from geology, ore texture and ore deposit geochemistry[J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 28(12): 3929-3937 (in Chinese with English abstract).
- [16] 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 383-389.
- Ding Xin, Jiang Shao-yong, Ni Pei, Gu Lian-xing, Jiang Yao-hui. Zircon SIMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province[J]. Geol J China Univ, 2005, 11(3): 383-389 (in Chinese with English abstract).
- [17] Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y, Wu F Y. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River metallogenic belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. Lithos, 2010, 119: 427-438.
- [18] 林文蔚, 彭丽君. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  [J]. 长春地质学院学报, 1994(2): 155-162.
- Lin Wen-wei, Peng Li-jun. The estimation of  $Fe^{3+}$  and  $Fe^{2+}$  contents in amphibole and biotite from EMPA data[J]. J Changchun Univ Earth Sci, 1994(2): 155-162 (in Chinese with English abstract).
- [19] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. US Geol Surv Prof Pap, 1960, 354-B: 1-49.
- [20] Nacht H, Ibhi A, Abia E H, Ohoud M B. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites[J]. Compt Rend Geosci, 2005, 337(16): 1415-1420.
- [21] 马昌前, 杨坤光, 唐中华, 李增田. 花岗岩类与岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地大

- 出版社, 1994: 210–212.
- Ma Chang-qian, Yang Kun-guang, Tang Zhong-hua, Li Zeng-tian. Magma-Dynamics of Granitoids — Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids[M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1994: 210–212 (in Chinese with English abstract).
- [22] Betsi T B, Lentz D R. Chemical composition of rock-forming minerals in granitoids associated with Au-Bi-Cu, Cu-Mo, and Au-Ag mineralization at the Freegold Mountain, Yukon, Canada: Magmatic and hydrothermal fluid chemistry and petrogenetic implications[J]. *Int Geol Rev*, 2013, 55(6): 657–691.
- [23] Selby D, Nesbitt B E. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization, Yukon, Canada: Evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry[J]. *Chem Geol*, 2000, 171(1): 77–93.
- [24] Moshefi P, Hosseinzadeh M R, Moayyed M, Lenze D R. Comparative study of mineral chemistry of four biotite types as geochemical indicators of mineralized and barren intrusions in the Sungun porphyry Cu-Mo deposit, northwestern Iran[J]. *Ore Geol Rev*, 2018, 97: 1–20
- [25] Afshooni S Z, Mirnejad H, Esmacily D, Haroni H A. Mineral chemistry of hydrothermal biotite from the Kahang porphyry copper deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran[J]. *Ore Geol Rev*, 2013, 54(32): 214–232.
- [26] Siahcheshm K, Calagari A A, Abedini A, Lentz D R. Halogen signatures of biotites from the Maher-Abad porphyry copper deposit, Iran: Characterization of volatiles in syn- to post-magmatic hydrothermal fluids[J]. *Int Geol Rev*, 2012, 54(12): 16.
- [27] Bao B, Webster J D, Zhang D H, Goldoff B A, Zhang R Z. Compositions of biotite, amphibole, apatite and silicate melt inclusions from the Tongchang mine, Dexing porphyry deposit, SE China: Implications for the behavior of halogens in mineralized porphyry system[J]. *Ore Geol Rev*, 2016, 79: 443–462.
- [28] Li S, Yang X Y, Huang Y, Sun W D. Petrogenesis and mineralization of the Fenghuangshan skarn Cu-Au deposit, Tongling ore cluster field, Lower Yangtze metallogenic belt[J]. *Ore Geol Rev*, 2014, 58: 148–162.
- [29] 傅金宝. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, 1981 (9): 18–21.
- Fu Jin-bao. Chemical composition characteristics of biotite in porphyry copper deposits[J]. *Geol Explor*, 1981 (9): 18–21 (in Chinese with English abstract).
- [30] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *Am Mineral*, 2005, 90: 316–328.
- [31] Tapster S, Condon D J, Naden J, Nobel S R, Petterson M G, Roberts N M W, Saunders A D, Smith D J. Rapid thermal rejuvenation of high-crystallinity magma linked to porphyry copper deposit formation; evidence from the Koloula Porphyry Prospect, Solomon Islands[J]. *Earth Planet Sci Letters*, 2016, 442: 206–217.
- [32] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. *Am Mineral*, 1965, 50: 1128–1272.
- [33] Uchida E, Endo S, Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resour Geol*, 2010, 57(1): 47–56.
- [34] 李万伦. 斑岩铜矿浅部富矿岩浆房研究进展[J]. *矿床地质*, 2011, 30(1): 149–155.
- Li Wan-Lun. Advances in study of shallow fertile magma chambers below porphyry copper deposits[J]. *Mineral Deposits*, 30(1): 149–155.
- [35] 唐攀, 陈毓川, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬, 方向. 西藏甲玛斑岩矿床系统黑云母特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2016, 35(4): 846–866.
- Tang Pan, Chen Yu-chuan, Tang Ju-xing, Zheng Wen-bao, Leng Qiu-feng, Lin Bin, Fang Xiang. Characteristics and geological significance of biotite in Jiama porphyry deposit system, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35(4): 846–866 (in Chinese with English abstract).
- [36] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Econ Geol*, 2010, 105: 3–41.
- [37] 王奖臻, 李朝阳, 胡瑞忠. 斑岩铜矿研究的若干进展[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 514–519.
- Wang Jiang-zhen, Li Chao-yang, HU Rui-zhong. Research progress in porphyry copper deposit[J]. *Adv Earth Sci*, 2001, 16(4): 514–519 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张云国, 周朝宪. 斑岩铜矿床研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1173–1190.
- Zhang Yun-guo, Zhou Chao-xian. Review on porphyry copper deposit[J]. *Adv Earth Sci*, 2011, 26(11): 1173–1190 (in Chinese with English abstract).
- [39] Wilkinson J J. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs[J]. *Nat Geosci*, 2013, 6: 917–925.
- [40] Coote A, Shane P, Stirling C, Reid M. The origin of plagioclase phenocrysts in basalts from continental monogenetic volcanoes of the Kaikohe-Bay of Islands field, New Zealand: Implications for magmatic assembly and ascent[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2018, 173(2): 14.
- [41] Tepley F J, Davidson J P, Clynne M A. Magmatic interactions as recorded in plagioclase phenocrysts of Chaos Crags, Lassen Volcanic Center, California[J]. *J Petrol*, 1999, 40(5): 787–806.
- [42] Henrich C A, Candela P A. Fluids and ore formation in the Earth's crust[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014: 1–28.
- [43] 陶继华, 岑涛, 龙文国, 李武显. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约[J]. *地质学报*, 2015, 22(2): 064–078.
- Tao Ji-hua, Cen Tao, Long Wen-guo, Li Wu-xian. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis[J]. *Geosci Front*, 2015, 22(2): 064–078 (in Chinese with English abstract).
- [44] Abdel-Rahman A M. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *J Petrol*, 1994, 35(2): 525–541.
- [45] 周作侠. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. *岩石学报*, 1986, 2(1): 61–72.
- Zhou Zuo-xia. The origin of intrusive mass in Fengshandong,

- Hubei Province[J]. *Acta Petrol Sinica*, 1986, 2(1): 61–72 (in Chinese with English abstract).
- [46] 杨波, 水新芳, 赵元艺, 朱小云, 王增科. 江西德兴朱砂红斑岩铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(1): 126–138.
- Yang Bo, Shui Xin-fang, Zhao Yuan-yi, Zhu Xiao-yun, Wang Zeng-ke. H-O-S-Pb isotopic characteristic of the Zhushahong porphyry copper deposit in Dexing, Jiangxi Province, and their significance[J]. *Acta Geol Sinica*, 2016, 90(1): 126–138 (in Chinese with English abstract).
- [47] 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 332–351.
- Hou Zeng-qian, Pan Xiao-fei, Yang Zhi-ming, Qu Xiao-ming. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits on related to oceanic slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 332–351 (in Chinese with English abstract).
- [48] 秦克章, 张连昌, 丁奎首, 许英霞, 唐冬梅, 徐兴旺, 马天林, 李光明. 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*, 2009, 25(4): 845–861.
- Qin Ke-zhang, Zhang Lian-chang, Ding Kui-shou, Xu Ying-xia, Tang Dong-mei, Xu Xing-wang, Ma Tian-lin, Li Guang-ming. Mineralization type, petrogenesis of ore-bearing intrusions and mineralogical characteristic of Sanchakou copper deposits in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2009, 25(4): 845–861 (in Chinese with English abstract).