



岩浆黑云母和热液黑云母矿物化学研究进展*

唐攀¹, 唐菊兴^{2**}, 郑文宝^{2,3}, 冷秋锋⁴, 林彬²

(1 成都理工大学地球科学学院, 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; 4. 西藏华钰矿业股份有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要 黑云母是岩浆岩和斑岩型矿床中重要的含水铁镁质成岩硅酸盐矿物。黑云母化学成分可以有效地指示岩浆性质、热液蚀变以及成矿过程。文章基于前人和作者的研究成果,系统地总结了黑云母矿物化学在黑云母分类、地质温度计、地质压力计、氧逸度等方面的应用,对岩石成因及构造背景的指示意义,卤素和卤素逸度评价岩浆热液过程、成矿潜力评价等方面的研究新进展,为斑岩型铜多金属矿床的成矿预测和勘查评价提供了最新的找矿矿物学证据。并提出了黑云母矿物化学在研究中存在的一些问题及未来的研究方向。

关键词 地质学 岩浆黑云母 热液黑云母 矿物化学 研究进展 斑岩矿床

中图分类号:P619.27⁺3

文献标志码:A

Progress in study of mineral chemistry of magmatic and hydrothermal biotites

TANG Pan¹, TANG JuXing², ZHENG WenBao^{2,3}, LENG QiuFeng⁴ and LIN Bin²

(1 College of Earth Sciences, 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; 4 Tibet Huayu Mining Development Co., Ltd., Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract

Biotite is an important hydrated ferromagnesian silicate mineral in most magmatic rock. Its composition is useful in understanding magmatic properties, hydrothermal alteration and ore-forming processes. Based on the research results of previous researchers and the authors, this paper systematically summarizes chemistry application of biotite mineral in such aspects as classification, geothermometer, geothermobarometry and oxygen fugacity, its indicating significance for petrogenesis and tectonic setting, the halogen and halogen fugacity ratios evaluating magmatic hydrothermal process, and the exploration evaluation. These data provide the latest mineralogical evidence for metallogenic prediction and prospecting evaluation of porphyry Cu polymetallic deposits. This paper also analyzes some problems in the study and points out the work that needs to be done in this area in future.

Key words: geology, magmatic biotites, hydrothermal biotites, mineral chemistry, progress in research,

* 本文由公益性行业专项(编号:201511022-02,201511017)国家自然科学基金项目(编号:41302060)和中国地质科学院基本科研业务费(编号:YYWF201608)联合资助

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 2016-05-26;改回日期 2017-07-01。秦思婷编辑。

porphyry deposit

20世纪50年代后期定量化学分析引入矿物化学研究中,矿物学研究不仅在分析测试、显微观察的手段上逐渐完善,而且分析观察趋向于向微区发展,比如电子探针(EMPA)、离子探针(IMA)、激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)等。与矿物分离分析相比,矿物原位微区分析可以有效避免矿物部分蚀变、杂质、包裹体等的影响,分析精度大大提高,使得矿物化学研究逐渐走向成熟。

黑云母,三八面体云母,分子式一般为 $(K, Na, Ca, Ba)X(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mg, Ti^{4+}, Mn, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH, F, Cl)_2$,是长英质岩浆岩中最常见的含水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)。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、氧逸度和成分)十分敏感,热动力条件的变化可以控制黑云母复杂的化学成分,因此,黑云母化学成分可以有效地指示岩浆-热液系统物化条件(Wones et al., 1965; Czamanske et al., 1973; Speer, 1987)。黑云母的研究越来越受到重视,尤其是在斑岩成矿系统中,黑云母矿物化学对岩浆性质、热液蚀变以及成矿过程具有重要的指示意义(Beane, 1974; Jacobs et al., 1976; 1979; Hendry et al., 1981; 1985; Chivas, 1981; Selby et al., 2000; Ayati et al., 2008; Boomeri et al., 2009; 2010; Siahcheshm et al., 2012; Afshooni et al., 2013; Parsapoor et al., 2015)。

对中国黑云母的研究相对较少,主要集中于岩浆黑云母对岩浆岩性质和成矿的指示意义(洪大卫, 1982; 周作侠, 1986; 张培萍等, 1991; 王晓霞, 1998; 熊小林等, 2001; 胡建等, 2006; 楼亚儿等, 2006; 李鸿莉等, 2007a; 2007b; 秦克章等, 2009; 刘彬等, 2010; 章健等, 2011; 弥佳茹等, 2014; 郭耀宇等, 2015; 陶继华等, 2015; 牛晓露等, 2015; 武宗林等, 2015; 陈慧军等, 2015),少量研究热液黑云母对矿化蚀变的指示意义(杨敏之, 1964; 傅金宝, 1981; 刘立钧等, 1984; 王葳平等, 2012; 唐攀等, 2016)。本文在前人大量的研究成果基础之上,结合作者的研究成果,系统地介绍了黑云母矿物化学研究进展,以期进一步促进对黑云母矿物化学的深入研究,为斑岩铜多金属矿床的找矿矿物学和成因矿物学研究提供基础资料。

1 黑云母分类

1.1 成分分类

国际矿物学协会(IMA)将黑云母分为4个端员的固溶体:铁云母[Annite, $KFe_3^{2+}AlSi_3O_{10}(OH)_2$]、金云母[Phlogopite, $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$]、铁叶云母[Siderophyllite, $KFe_2^{2+}AlAl_2Si_2O_{10}(OH)_2$]和富镁黑云母[Eastonite, $KMg_2AlAl_2Si_2O_{10}(OH)_2$] (Rieder et al., 1998)。

1.2 成因分类

按照成因分类,黑云母分为岩浆黑云母和热液黑云母(Jacobs et al., 1976; 1979; 傅金宝, 1981; Selby et al., 2000)。岩浆黑云母形成于岩浆结晶过程中,热液黑云母形成于热液蚀变过程。岩浆黑云母常呈斑晶或显微斑晶,多为自形-半自形的片状产出,具有锯齿状、裂片、散口、扭曲等特征,包裹早期结晶的磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石等副矿物,沿着边缘或裂隙被绿泥石或热液黑云母交代。

热液黑云母产状明显不同于岩浆黑云母,又可以分为热液交代黑云母(交代角闪石和岩浆黑云母,极少交代斜长石)和热液新生黑云母(交代黑云母以外的其他热液次生黑云母)(Jacobs et al., 1976; 1979; 傅金宝, 1981; Selby et al., 2000; Ayati et al., 2008; 唐攀等, 2016)。热液交代黑云母沿着边缘和裂隙部分或全部交代角闪石和岩浆黑云母,重结晶成细鳞片状集合体,呈半自形-他形产出。

热液新生黑云母可以分为弥散状黑云母和脉状黑云母(Jacobs et al., 1976; 1979; Selby et al., 2000; Ayati et al., 2008; 唐攀等, 2016)。弥散状黑云母常呈极细-细的片状或少量的片状集合体散布于岩体中,其明显与热液蚀变有关。对于很弱的或者没有明显的热液蚀变,这种弥散状的黑云母既可以是岩浆黑云母,也可以是热液黑云母。脉状黑云母常呈自形-半自形-他形,粗-中粒片状,与石英和金属硫化物等共生。

岩浆黑云母和热液黑云母不仅在岩相学上存在较大的差别,在矿物化学性质方面也存在差异。2类黑云母成因存在较大差别,对于客观地识别其指示意义,正确地区分2类黑云母至关重要。Beane (1974)研究北美斑岩铜矿床中的黑云母,得出岩浆

黑云母 $Mg/Fe < 1.0$, 蚀变黑云母 $Mg/Fe > 1.5$ 和 $Fe^{3+}/Fe^{2+} < 0.3$; 用 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 三角图解可以区分岩浆黑云母和蚀变黑云母。

Nachit 等(2005)用 $10TiO_2-FeO^*-MgO$ ($FeO^* = FeO_{tot} + MnO$) 三角分类图区分岩浆黑云母、重结晶黑云母和新生黑云母(图 1), 选择这 3 个端员的原因为: ① 黑云母 2 个端员——金云母(Mg)和铁云母(Fe^{2+}), 其中, 黑云母的 $X_{FeO^*} = FeO^*/(FeO^* + MgO)$ 值取决于岩体的性质, 其值从基性岩体($X_{FeO^*} \approx 0$)到长英质岩体($X_{FeO^*} \approx 1$)为增加(Abrecht et al., 1988); ② 黑云母 Ti 含量与热条件有关(Robert, 1976), 并且随岩体的 X_{FeO^*} 值变化(Abrecht et al., 1988); ③ 蚀变黑云母常与重结晶的 Fe-Ti 氧化物(金红石、锐钛矿、钛铁矿)有关, 并且能通过光学显微镜明显的观察到(如褪色, 多色性减弱等)。

傅金宝(1981)通过整理中国一些斑岩铜矿床中黑云母的数据, 得出岩浆黑云母具有高 Ti、低 Al 的特点, $w(TiO_2) > 3\%$, $w(Al_2O_3) < 15\%$; 热液新生黑云母则低 Ti、高 Al, $w(TiO_2) < 3\%$ (多数 $< 2\%$), $w(Al_2O_3) > 15\%$; 热液交代黑云母的 Ti、Al 含量介于前两者之间, 表明交代过程中元素具有继承性。反映在 Al_2O_3/TiO_2 比值上, 岩浆黑云母多 $< 3.5\%$, 热液黑云母多 $\gg 7$, 热液交代黑云母同样居前两者之间。黑云母中 Ti 含量与热条件有关(Robert, 1976),

岩浆黑云母形成温度较高, 导致其 Ti 含量普遍高于热液黑云母。

Jacobs 等(1976; 1979)研究 Santa Rita、Bingham 和 Ely 斑岩矿床中的黑云母, 岩浆黑云母 Ba 含量高, 热液黑云母具有高的 Mg、F、Si 值, 低 Ti 值。Parsapoor 等(2015)研究 Darreh-Zar 斑岩铜矿床的岩浆黑云母和热液黑云母得出, 岩浆黑云母比热液黑云母具有高 Ti、低 Al。王葳平等(2012)和唐攀等(2016)研究甲玛斑岩铜多金属矿床得出, 热液黑云母的 Mg 含量比岩浆黑云母高, 具有低 Ti、高 Al 的特征。

在斑岩矿床中, 不同蚀变带的黑云母矿物化学也具有较大的差别。Jaconbs 等(1979)研究 Santa Rita 斑岩铜矿床黑云母得出, 绢英岩化带热液黑云母具有明显的高 Al 含量。Ayati 等(2008)研究 Dalli 斑岩铜矿床热液黑云母得出, 钾化带热液黑云母的 FeO、 TiO_2 、 MnO 、 K_2O 、 Na_2O 含量比绢英岩化带高。Boomeri 等(2010)研究 Sarcheshmeh 斑岩铜矿床黑云母得出, 与绢英岩化带相比, 钾化带热液黑云母具有较高的 Mg 含量。Afshooni 等(2013)研究 Kahang 斑岩铜矿床热液黑云母得出, 与绢英岩化带相比, 钾化带热液黑云母具有明显的低 Al 和高 K、Fe、Ti、Na 特征。

2 地质温度计

黑云母中的 Ti 含量对温度和氧逸度非常敏感, 因此, Ti 的含量可以有效地估算火成岩和变质岩中黑云母形成温度(Patino Douce, 1993; Robert, 1976)。Henry 等(2005)研究美国缅因州西部和马萨诸塞州中南部 529 个黑云母化学成分, 得出 Ti 含量、温度和 $Mg/(Mg + Fe)$ 值存在非线性关系(图 2), 利用 Ti 含量计算黑云母形成温度(式(1))。Parsapoor 等(2015)利用 Ti 温度计估算 Darreh-Zar 斑岩铜矿床岩浆黑云母形成温度为 $600 \sim 650^\circ C$ 。唐攀等(2016)利用 Ti 温度计估算甲玛斑岩铜多金属矿床岩浆黑云母形成温度为 $730 \sim 750^\circ C$ 。Sarjoughian 等(2015)利用 Ti 温度计估算与 Cu-Au 矿化有关的 Kuh-e Dom 深成岩体岩浆黑云母形成温度为 $720 \sim 750^\circ C$ 。郭耀宇等(2015)利用 Ti 温度计估算西秦岭格尔括合花岗闪长斑岩岩浆黑云母形成温度为 $629 \sim 684^\circ C$ 。

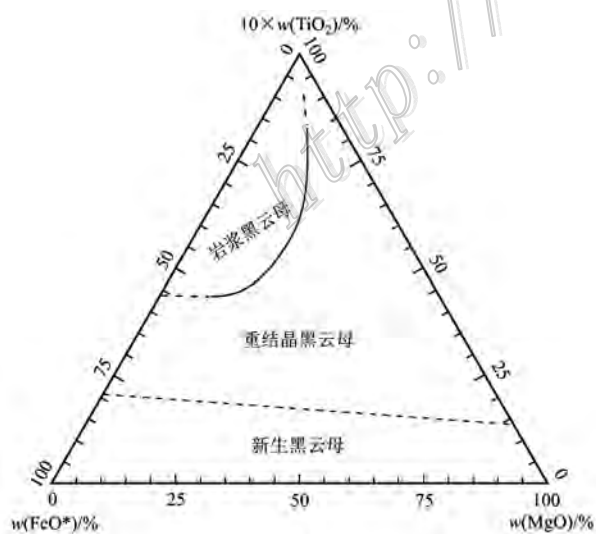


图 1 黑云母 $10TiO_2-FeO^*-MgO$ 分类图解
(据 Nachit et al, 2005)

Fig. 1 $10TiO_2-FeO^*-MgO$ classification diagram of biotite compositions (after Nachit et al, 2005)

$$FeO^* = FeO_{tot} + MnO$$

$$t = \{[\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3]/b\}^{0.333} \quad (1)$$

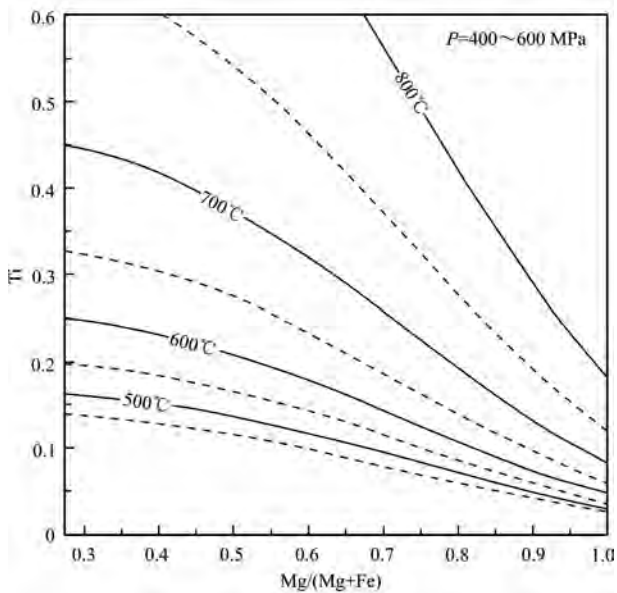


图2 黑云母的 Ti-Mg/(Mg+Fe)图解(据 Henry et al., 2005)

Fig. 2 Ti-Mg/(Mg+Fe) variation diagram for estimation of temperature (after Henry et al., 2005)

其中, $a = -2.3594$; $b = 4.6482 \times 10^{-9}$; $c = -1.7283$; 基于 22 个氧原子, $X_{Mg} = 0.275 \sim 1.000$; $Ti = 0.04 \sim 0.60$, $t = 480 \sim 800^\circ\text{C}$, $p = 400 \sim 600$ MPa。

Wones 等(1965)研究表明,黑云母成分变化可以用于地质温度估算,提出 $\log f(\text{O}_2)$ - t 地质温度计。该温度计适用于高温高压条件下,而不能扩展到近大气压和 $100 \sim 300^\circ\text{C}$ 的硅酸盐-硫化物热液系统中地质温度估算。Beane(1974)提出热液黑云母地质温度计—— t - X_{phl} , 计算北美 Santa Rita、Ray、Safford、Bingham、Hanover 和 Galore Creek 斑岩矿床钾化带中热液黑云母形成温度,热液黑云母与磁铁矿和钾长石共生(图3)。Ayati 等(2008)和 Afshooni 等(2013)应用 t - X_{phl} 地质温度计算 Kahang 和 Dalli 斑岩矿床中热液黑云母形成温度(图3)。

3 地质压力计

Uchida 等(2007)研究表明,黑云母中的全铝含量($T\text{Al}$)与花岗岩的固结压力具有很好的正相关性,可以用全铝含量估算固结压力(式(2))。从而进一步估算侵位深度,采用 $p = \rho g H$ 进行换算。

$$p(\times 100 \text{ MPa}) = 3.03 \times T\text{Al} - 6.53(\pm 0.33) \quad (2)$$

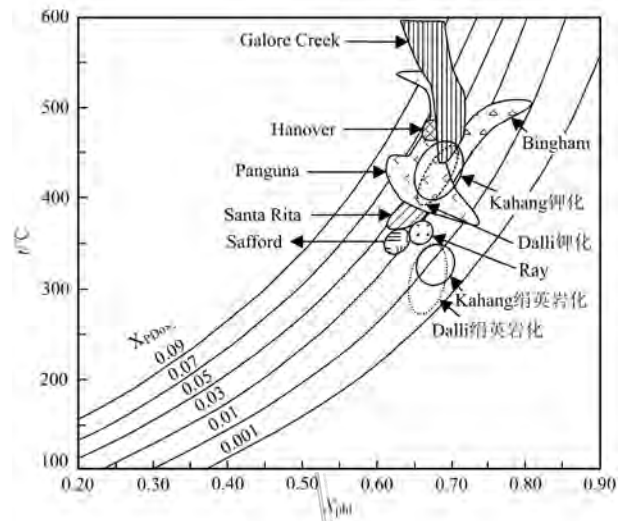


图3 黑云母的 t - X_{phl} 图解(据 Beane, 1974;

Ayati et al., 2008; Afshooni et al., 2013 修改)

Galore Creek、Santa Rita、Safford、Ray 和 Hanover 斑岩铜矿床黑云母数据引自 Beane, 1974; Panguna、Bingham、Dalli、Kahang 斑岩铜矿床黑云母数据引自 Ford, 1978; Lanier et al., 1978; Ayati et al., 2008; Afshooni et al., 2013

Fig. 3 Compositions of biotite on t - X_{phl} diagram (modified after Beane, 1974; Ayati et al., 2008; Afshooni et al., 2013)

Galore Creek, Santa Rita, Safford, Ray, and Hanover porphyry copper deposits are from Beane, 1974; Panguna, Bingham, Dalli and Kahang porphyry copper deposit are from Ford, 1978; Lanier et al., 1978; Ayati et al., 2008; Afshooni et al., 2013

其中, $T\text{Al}$ 为以 22 个氧原子为基础计算出的黑云母中铝阳离子总数。

许多学者利用黑云母全铝压力计估算岩体的结晶压力和形成深度,进而探讨岩体的形成条件及成矿的潜力。郭耀宇等(2015)利用黑云母全铝压力计估算西秦岭格尔括合花岗闪长斑岩的结晶压力为 $131 \sim 181$ MPa, 相应的侵位深度为 $5.0 \sim 7.1$ km。唐傲等(2015)利用黑云母全铝压力计估算赣中紫云山岩体含矿花岗岩结晶压力为 $253 \sim 322$ MPa, 对应的侵位深度为 $9.56 \sim 12.18$ km。许腾等(2015)利用黑云母全铝压力计估算河南栾川矿集区燕山期 2 类岩体的结晶压力, 得出南泥湖和上房沟岩体结晶压力为 $38 \sim 115$ MPa, 结晶深度为 $1.4 \sim 4.4$ km。武宗林等(2015)利用黑云母全铝压力计估算栾川矿集区黄背岭-中鱼库花岗岩结晶压力, 得出从岩体浅部到深部, 黄背岭岩体结晶压力为 $93 \sim 14$ MPa, 结晶深度为 $3.4 \sim 0.5$ km; 中鱼库岩体结晶压力为 $145 \sim$

58 MPa, 结晶深度为 5.3~2.1 km。两个岩体浅部结晶压力大, 深部结晶压力小, 表明两者均为快速侵入。陈慧军等(2015)利用黑云母全铝压力计估算滇西古永地区花岗岩结晶压力为 67~120 MPa, 结晶深度为 2.54~4.55 km, 表明本区花岗岩形成于相对较浅的环境。相对于古永花岗岩体, 小龙河花岗岩体具有更大的锡成矿潜力。东前等(2011)利用黑云母全铝压力计估算江西武山花岗闪长斑岩结晶压力为 86~103 MPa, 对应的侵位深度为 2.84~3.39 km, 表明该岩体形成于相对较浅环境, 具有较大成矿潜力, 有利于武山矽卡岩铜矿的形成。

4 氧逸度

Wones 等(1965)研究表明, 黑云母 X_{Mg} ($X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$) 随岩浆和流体中的氧逸度或硫逸度增加而增加; 随岩浆系统氧逸度增加, 熔体中的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值增加, 更少的 Fe^{2+} 与 Mg^{2+} 竞争进入镁铁质矿物的晶体结构中。因此, 随着氧逸度增加, 镁铁质矿物的 X_{Mg} 相应增加, 镁铁质矿物中高 X_{Mg} 是高氧逸度岩浆的一个特征。Wones 等(1965)通过实验提出的 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 图解可以估计氧逸度缓冲剂, 包括磁铁矿-钛铁矿缓冲剂 ($Fe_3O_4-Fe_2O_3$, HM), 镍-氧化镍缓冲剂 ($Ni-NiO$, NNO) 和铁橄榄石-石英-磁铁矿缓冲剂 ($Fe_2SiO_4-SiO_2-Fe_3O_4$, QFM); $\log(f(O_2)-t)$ 图解可以估算氧逸度值。

该氧逸度计被广泛应用于花岗岩和斑岩矿床中。Zhang 等(2016)利用黑云母氧逸度计研究 Sisson Brook W-Mo-Cu 矿床周围的长英质侵入岩体, 黑云母花岗质岩脉具有高氧逸度(NNO), 而其他岩体氧逸度较低(QFM), 认为仅考虑岩浆的演化程度和氧逸度, 黑云母花岗质岩脉最有可能是成矿流体的来源。Parsapoor 等(2015)利用黑云母氧逸度计研究 Darreh-Zar 斑岩铜矿床岩浆-热液演化过程的氧逸度, 岩浆阶段氧逸度缓冲剂为 NNO, 热液阶段氧逸度缓冲剂从 NNO 升高到 HM, 再降低到 FQM。唐攀等(2016)利用黑云母氧逸度计研究甲玛斑岩铜多金属矿床岩浆-热液演化过程, 得出岩浆向热液氧化过程中, 氧逸度增高, 即岩浆氧逸度缓冲剂为 NNO, 热液阶段氧逸度缓冲剂为 HM, 并认为高氧逸度有利于斑岩矿床的形成。刘彬等(2010)利用黑云母氧逸度计研究鄂东南铜山口斑岩(钼)矿床, 得出成矿岩体花岗闪长斑岩的氧逸度缓冲剂为 NNO。武

宗林等(2015)利用黑云母氧逸度计估算栾川矿集区黄背岭-中鱼库花岗岩氧逸度分别为 $10^{-11.8} \sim 10^{-10}$ 和 $10^{-13.08} \sim 10^{-10.4}$ (均为 NNO), 认为高氧逸度有利于斑岩型钼钨多金属成矿。许腾等(2015)利用黑云母氧逸度计估算河南栾川矿集区成矿的南泥湖、上房沟岩体氧逸度为 $10^{-11.3} \sim 10^{-10}$, 不成矿的老君山岩体氧逸度较低, 为 $10^{-12.4} \sim 10^{-11.5}$, 认为高氧逸度是岩体形成斑岩-矽卡岩型矿床的原因之一。

李鸿莉等(2007a)利用黑云母氧逸度计研究芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩, 角闪石黑云母花岗岩的氧逸度为 $10^{-16.00} \sim 10^{-15.31}$, 与成矿流体有关的黑云母花岗岩的氧逸度为 $10^{-19.20} \sim 10^{-17.50}$, 认为低氧逸度花岗岩有利于锡成矿。李鸿莉等(2007b)利用黑云母氧逸度计研究岩背火山-斑岩型锡矿含黄玉黑云母花岗岩和含黄玉花岗斑岩, 前者氧逸度较高, 为 $10^{-15.5} \sim 10^{-15.7}$, 后者氧逸度较低, 为 $10^{-19.2} \sim 10^{-18.7}$, 与锡成矿关系更密切。

章健等(2011)利用黑云母氧逸度计研究产铀和非产铀花岗岩, 产铀花岗岩的氧逸度较低 ($10^{-16.5} \sim 10^{-15.0}$), 非产铀花岗岩氧逸度较高 ($10^{-12.4} \sim 10^{-12.5}$)。陈佑纬等(2010)利用黑云母氧逸度计研究贵东岩体, 不产铀的鲁溪岩体氧逸度较高 ($10^{-12} \sim 10^{-11.5}$), 而下庄岩体氧逸度较低 ($10^{-14.5} \sim 10^{-15.5}$)。陈佑纬等(2013)利用黑云母氧逸度计研究陕南光石沟伟晶岩型铀矿床, 与不产铀伟晶岩相比, 产铀伟晶岩更靠近 NNO 缓冲线, 氧逸度更低。

5 岩石成因及构造背景

大量的研究已经证明黑云母的成分对花岗岩类的岩石学具有重要的指示意义(Dodge et al., 1969; Barrière et al., 1979; Neiva, 1981; Speer, 1981; Ague et al., 1988; Finch et al., 1995)。除上述黑云母成分可以估算氧逸度、地质温度和地质压力外, 在某些情况下, 黑云母的成分也可以作为构造背景的指示剂(Nachit et al., 1985; Lalonde et al., 1993; Burkhard, 1993; Abdel-Rahman, 1994; 周作侠, 1986)。

黑云母普遍存在于所有类型的花岗岩和花岗岩类中, 由于这两种岩类的结晶结构的特殊性, 在花岗岩岩浆中黑云母能调整它们大多所共有的元素(Shabani et al., 2003)。黑云母能探究岩浆成分, 主要因其具有以下特征: ① 对不含或含有少量的石榴

子石、堇青石或 Al_2SiO_5 同质多形体的花岗岩类,黑云母是最重要的过量铝的储存器,因此,黑云母可以直接反应母岩岩浆铝饱和度;②黑云母是最快速有效的氧化态指示剂(Shabani et al., 2003)。黑云母是主要的过铝质矿物,黑云母的铝饱和指数与母岩岩体的铝饱和指数呈正相关关系(De Albuquerque, 1973; Speer, 1981; Lalonde et al., 1993)。

A型花岗岩黑云母富Fe, I型花岗岩富Mg, S型花岗岩则明显富Al(Abdel-Rahman, 1994; Shabani et al., 2003)。黑云母的氧化系数和镁质率 $Mg^\#$ 也可作为划分I型与S型花岗岩的依据,前者中的黑云母具有较高的氧化系数(0.252~0.121)及较高的 $Mg^\#$ (0.384~0.626), 而后者则较低(徐克勤等, 1986)。Dahlquist等(2010)的 $Fe/(Fe+Mg)$ -F图解(图4)区分A型、钙碱性I和S型花岗岩。Jiang等(2002)的 Al^{IV} - $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 图解(图5)区分A型、I型花岗岩和钾玄质花岗岩。

De Albuquerque(1973)研究表明, $MgO-FeO_{tot}-Al_2O_3$ 图解可以区分黑云母是否与角闪石共生,与其他铁镁矿物共生,与白云母共生,以及与其他铝硅酸盐矿物共生(硅线石或红柱石)。Nachit等(1985)的Al-Mg图解将母岩岩浆分为4类:过铝质、钙碱性、亚碱性、碱性-过碱性。Abdel-Rahman(1994)通过对不同构造环境下岩浆岩中325件黑云母成分研究表明,黑云母 $MgO-FeO_{tot}-Al_2O_3$ 图解可以判别母岩岩

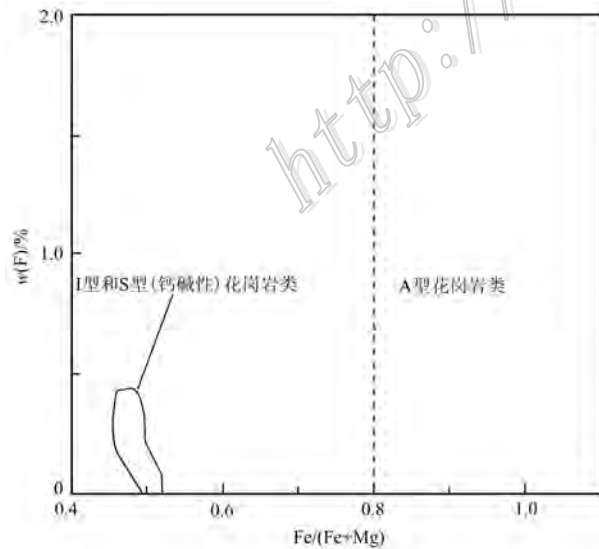


图4 黑云母 $Fe/(Fe+Mg)$ -F图解(据 Dahlquist et al., 2010)

Fig. 4 Compositions of biotite on $Fe/(Fe+Mg)$ -F diagram (after Dahlquist et al., 2010)

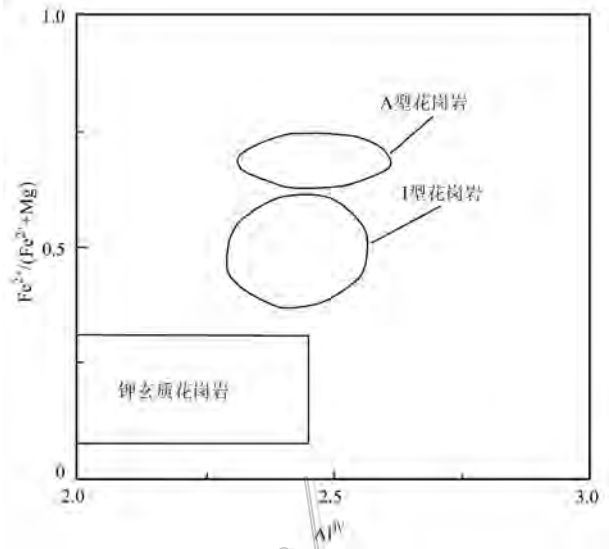


图5 黑云母 Al^{IV} - $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 图解(据 Jiang et al., 2002)

Fig. 5 Compositions of biotite on Al^{IV} - $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ diagram (after Jiang et al., 2002)

浆的性质(过铝质、钙碱性、碱性和碱性-过碱性)。Sallet(2000)通过系统整理花岗岩类的 $IV(F)$ (F表示在黑云母中的相对富集程度)得出,钙碱性花岗岩类的黑云母具有较高的 $IV(F)$ (1.1~2.8, 平均值2.19),高K钙碱性花岗岩类的黑云母具有中等 $IV(F)$ (0.75~1.7, 均值1.42),高Si碱性花岗岩类的黑云母具有较低的 $IV(F)$ (-0.8~1.9, 均值0.56),过铝质花岗岩类的黑云母具有变化较大的 $IV(F)$ (0.2~2.3, 均值1.5)。

Czamanske等(1981)和Lalonde等(1993)研究表明,磁铁矿系列和钛铁矿系列花岗岩的黑云母成分在 $Fe/(Fe+Mg)$ -Al分类图解中显示连续性变化,磁铁矿系列黑云母富Mg、贫Al,而钛铁矿系列的Fe、Al含量增加;Karimpour(2011)将伊朗Maherabad、Dehnow、Gheshlagh、Khajehmourad和Najmabad地区的磁铁矿系列和钛铁矿系列花岗岩黑云母成分投于 $Al_2O_3-TiO_2$ 图解中,2个系列的花岗岩呈现明显的不同,磁铁矿系列花岗岩中的黑云母具有高的 Al_2O_3 含量,低的 TiO_2 含量,而钛铁矿系列花岗岩中的黑云母具有低的 Al_2O_3 含量,高的 TiO_2 含量。

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 $w(\sum FeO)/w(\sum FeO+MgO)-w(MgO)$ 图解判别花岗岩物质来源:壳源、壳

幔混源和幔源。Ague 等(1988)研究指出, $\log(X_F/X_{OH}) - \log(X_{Mg}/X_{Fe})$ 图解区分 I 型花岗岩类混染程度(混染程度广义上讲是指从上地幔、深地壳或者俯冲板片演化形成的铁镁质 I 型岩浆与大陆地壳来源成分相互作用): I-WC 型指弱混染的 I 型花岗岩类, I-MC 型指中等混染的 I 型花岗岩类, ISC 型指强烈混染的 I 型花岗岩类, I-SCR 型指强烈混染的还原性 I 型花岗岩类。

胡建等(2006)研究广东龙窝和白石岗岩体黑云母得出, 黑云母的成分特征可作为岩浆分异演化程度的良好示踪剂, 随着岩浆分异演化程度的增高, 黑云母的 Rb 含量依次增高, 而 Ba 含量则渐次降低, Rb/Ba 比值显著增大(图 6)。Smith 等(2011)利用黑云母矿物化学成分研究印尼苏门答腊岛多巴火山碎屑, 形成时代较早的多巴火山凝灰岩中的黑云母具有较低的 FeO/MgO 比值(2.1~2.6), 形成时代较晚的多巴火山凝灰岩中的黑云母具有较高的 FeO/MgO 比值(2.8~3.7)。

黑云母成分对岩体成因和岩浆构造背景是一种

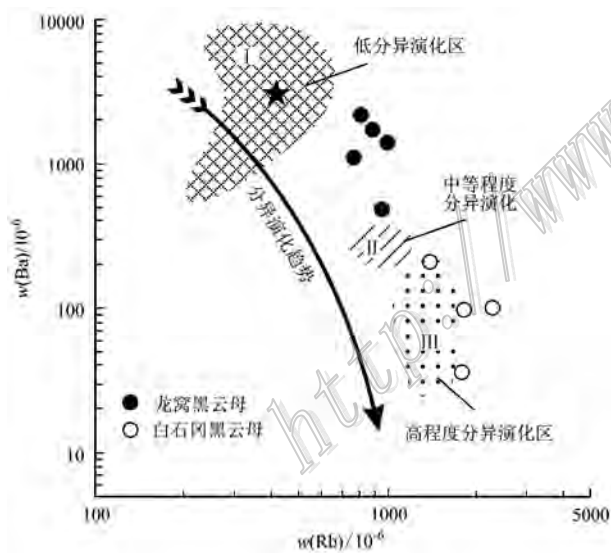


图 6 黑云母 Rb-Ba 图解(据胡建等, 2006)

★—蛇绿杂岩体闪长岩中镁质黑云母(Bea et al., 1994); I—据西藏羌塘北部安山岩中黑云母圈定(赖绍聪等, 2002); II、III—分别据葡萄牙中部 Viseu 地区斑状黑云母花岗岩和二云母花岗岩圈定(Neves, 1997)

Fig. 6 Compositions of biotite on Ba-Rb diagram (after Hu et al., 2006)

★—Mg-biotite in diorite of ophiolite complex rock mass (Bea et al., 1994); I—Delineated according to biotites in andesite in the north of Qiangtang, Tibet (Nai et al., 2002); II, III—Delineated according to biotites in porphyritic biotite granite and two-mica granite in Viseu area in Central Portuguese, respectively (after Neves, 1997)

非常好的指示剂, 但是仍然需要结合其他资料, 比如母岩体主、微量元素、同位素、区域和其他地质资料(Abdel-Rahman, 1994; Shabani et al., 2003; 胡建等, 2006)。

6 卤素

6.1 卤素含量

对于不含白云母和萤石的花岗岩, 70%~90% 的 F 都进入到黑云母中, 剩下的保存在磷灰石和榍石中(Grabazkev et al., 1979; Zhang et al., 2016)。黑云母中的 F 和 Cl 是通过 F-OH 和 Cl-OH 交换进入黑云母, 并且 F 的含量普遍比 Cl 高, 是因为 Cl^- 离子半径(1.81Å, Å 表示离子半径, 1Å = 100 pm(皮米))比 F^- 或 OH^- 的大, Cl 替换 OH 比 F 少(Munoz, 1984)。因此, 虽然对于那些黑云母中 Cl 含量较少, 但与黑云母形成有关的熔体或热液中的 Cl 含量却非常丰富。Munoz(1984)通过实验研究表明, 卤素替换黑云母羟基的含量受 Mg/Fe 比值控制, 具有高 Mg/Fe 比值的黑云母趋于含有更多的 F, 而 Mg/Fe 比值较低的黑云母趋于含有更多的 Cl, 这种关系是由于结晶化学的影响造成的, 即黑云母中 F-Fe 和 Mg-Cl 之间具有晶格占位的回避原则(F-Fe avoidance principle 和 Mg-Cl avoidance principle)。Kahang 和 Dalli 斑岩铜矿床绢云岩化带、Deboullie 深成岩体、Midukhe 和 Sarcheshmeh 斑岩铜矿床中黑云母的 F、Cl 含量与 F-Fe、Mg-Cl 在黑云母中占位回避原则结晶化学规则相符(Afshooni et al., 2013; Ayati et al., 2008; Loferski et al., 1995; Boomeri et al., 2009; 2010); 而 Darreh-Zar 斑岩铜矿床、Kahang 和 Dalli 斑岩铜矿床钾化带、Casino 斑岩 Cu-Au-Mo 矿床中黑云母的 F、Cl 含量与 F-Fe、Mg-Cl 在黑云母中占位回避原则结晶化学规则不相符(Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013; Ayati et al., 2008; Selby et al., 2000)。Zhu 等(1992)研究表明, 在相同的物理化学条件形成的黑云母, $\log(X_F/X_{OH}) - X_{Mg}$ 、 $\log(X_{Cl}/X_{OH}) - X_{Mg}$ 和 $\log(X_{Cl}/X_F) - X_{Mg}$ 图解具有线性化学趋势。

Munoz(1984)用黑云母的 F 和 Cl 截距值表示其在黑云母中的相对富集程度, 即 $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 和 $IV(F/Cl)$, $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 和 $IV(F/Cl)$ 由黑云母 X_{phl} 、 X_{sid} 和 X_{ann} 计算获得, 计算公式如下:

$$IV(F) = 1.5X_{Mg} + 0.42X_{ann} + 0.20X_{sid} - \log(X_F/X_{OH})$$

$$IV(Cl) = -5.01 - 1.93X_{Mg} - \log(X_{Cl}/X_{OH})$$

$$IV(F/Cl) = IV(F) - IV(Cl)$$

其中, $X_{Mg} = Mg/(八面体阳离子总数)$; X_{sid} 是黑云母中的铁叶云母摩尔分数; X_{ann} 是黑云母中的铁云母摩尔分数, 其计算公式如下(Yavuz, 2003a; 2003b):

$$X_{sid} = [(3 - Si/Al)/1.75][1 - X_{Mg}]$$

$$X_{ann} = 1 - (X_{Mg} - X_{sid})$$

$IV(F)$ 值越小表示黑云母中 F 富集程度越高; $IV(Cl)$ 基本上都为负值, 负得越多表明黑云母中 Cl 富集程度越高(Munoz, 1984)。 $IV(F/Cl)$ 不受平衡体系温度和黑云母中 OH 的含量控制, 因此直接与 $f(HCl)/f(HF)$ 逸度比值有关(Munoz, 1984)。 Parsapoor 等(2015)通过整理斑岩铜矿床、Sn-W-BE 矿床和斑岩钼矿床黑云母的 $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 和 $IV(F/Cl)$, 发现斑岩铜矿床形成于富 Cl 的岩浆系统, 斑岩钼矿床形成于富 F 的岩浆系统(图 7)。 Miduk、Sarcheshmeh、Dalli、Darreh-Zar、Kahang 斑岩铜矿床的黑云母均位于 $IV(F/Cl)$ - $IV(F)$ 图解(图 8)的斑岩铜矿床区域。与斑岩铜矿床有关的侵入体中的黑云母具有富 Mg 特征(Moore et al., 1973; Selby et al., 2000), 与斑岩铜矿床有关的黑云母普遍没有显著的富 Cl 标志(Ayati et al., 2008; Boomeri et al., 2009;

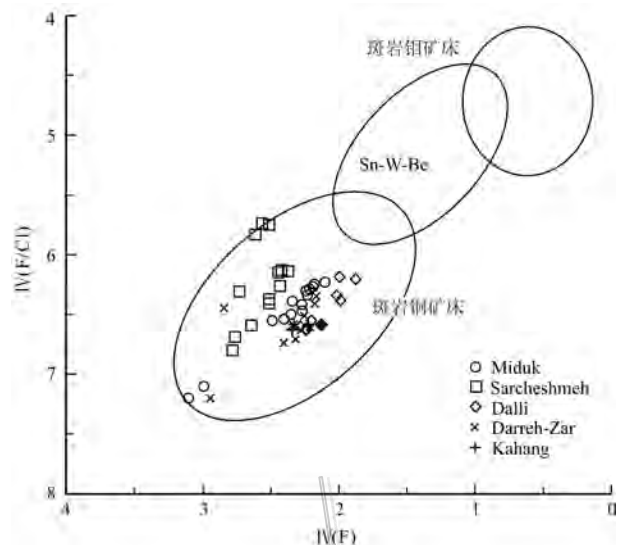


图 8 黑云母的 $IV(F/Cl)$ - $IV(F)$ 图解

(据 Munoz, 1984; Boomeri et al., 2009 修改)

Miduk, Sarcheshmeh, Dalli, Darreh-Zar, Kahang 斑岩铜矿床黑云母数据分别引自 Boomeri et al., 2009; 2010; Ayati et al., 2008; Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013

Fig. 8 Compositions of biotite on $IV(F/Cl)$ - $IV(F)$ diagram (modified after Munoz, 1984; Boomeri et al., 2009)

Miduk, Sarcheshmeh, Dalli, Darreh-Zar, Kahang porphyry copper deposits are from Boomeri et al., 2009; 2010; Ayati et al., 2008; Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013

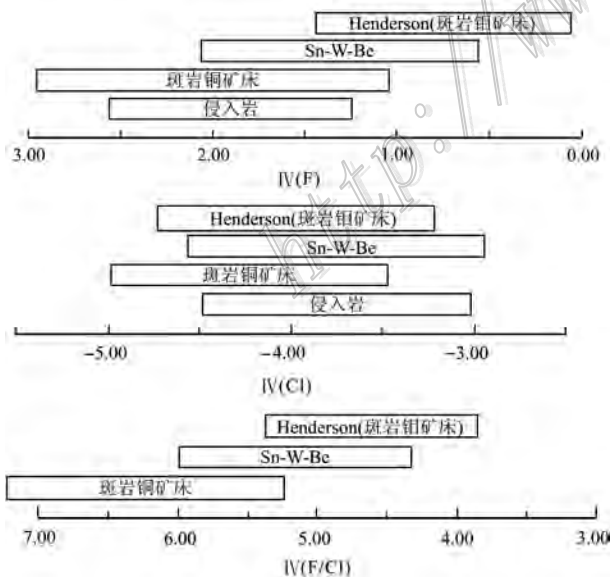


图 7 斑岩铜矿床、斑岩钼矿床和 Sn-W-BE 矿床的 $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 和 $IV(F/Cl)$ 对比图(据 Parsapoor et al., 2015; 对比数据引自 Munoz, 1984)

Fig. 7 Comparison of $IV(F)$, $IV(Cl)$ and $IV(F/Cl)$ in Sn-W-BE, Mo and Cu porphyries (after Parsapoor et al., 2015; The compared data are from Munoz, 1984)

2010; Afshooni et al., 2013; Parsapoor et al., 2015), 这是因为黑云母富镁(Mg-Cl 在黑云母中占位回避原则), 以及 Cl^- 离子半径(1.81\AA)比 F^- 或 OH^- 大, Cl 替换 OH 比 F 少(Munoz, 1984)。因此, 即便镁质云母或金云母中 Cl 的含量极少, 也需要富 Cl 的熔体或热液流体才能形成。

Ayati 等(2008)和 Afshooni 等(2013)研究 Dalli 和 Kahang 斑岩铜矿床热液黑云母中的卤素得出, 钾化带热液黑云母比绢英岩化带具有较高的 $IV(F)$ 和 $IV(F/Cl)$, 较低的 $IV(Cl)$, 因此, 钾化带成矿流体更富 Cl, 绢英岩化成矿流体带更富 F。Parsapoor 等(2015)研究 Darreh-Zar 斑岩铜矿床黑云母得出, 从岩浆向热液演化过程中, $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 和 $IV(F/Cl)$ 逐渐减少, 说明成矿热液更加富含挥发分(F、Cl), 对成矿物质的运移具有重要的作用。

6.2 卤素逸度

卤素在金属元素运移中具有重要的作用, 因此, 计算成矿侵入岩和热液系统的卤素逸度受到广泛的研究(Loferski et al., 1995; Munoz, 1984; 1992; Selby et al., 2000)。Munoz(1992)基于黑云母和热

液流体之间的 F-Cl-OH 交换改进系数(Zhu et al., 1991; 1992),用黑云母成分计算与黑云母成分平衡的硅酸盐熔体和含水流体相的卤素逸度比值,计算公式如下:

$$\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))^{\text{fluid}} = 1000/T[2.37 + 1.1$$

$$(X_{\text{phl}})^{\text{biotite}}] + 0.43 - \log(X_{\text{F}}/X_{\text{OH}})^{\text{biotite}}$$

$$\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))^{\text{fluid}} = 1000/T[1.15 +$$

$$0.55(X_{\text{phl}})^{\text{biotite}}] + 0.68 - \log(X_{\text{Cl}}/X_{\text{OH}})^{\text{biotite}}$$

$$\log(f(\text{HF})/f(\text{HCl}))^{\text{fluid}} = -1000/T[1.22 +$$

$$1.65(X_{\text{phl}})^{\text{biotite}}] + 0.25 + \log(X_{\text{F}}/X_{\text{Cl}})^{\text{biotite}}$$

式中, T 为卤素交换的绝对温度, X_{phl} 为 Mg/八面体阳离子总数, X_{F} 、 X_{Cl} 和 X_{OH} 为黑云母羟基位置的 F、Cl 和 OH 的摩尔分数。

Selby 等(2000)根据前人资料重新计算 Bingham 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床(分析数据来自 Bowman et al., 1987; Lanier et al., 1978; Parry et al., 1978)、Santa Rita 斑岩 Cu 矿床(分析数据来自 Jacobs et al., 1979)、Los Pelambres 和 Bakircay 斑岩 Cu-Mo 矿床(分析数据来自 Taylor, 1983)、Hanover 斑岩 Cu-Au 矿床(分析数据来自 Jacobs et al., 1979)中黑云母的卤素逸度比值,并投于 $\log(f(\text{HF})/f(\text{HCl}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ 和 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ 图解(图 9)中,与 Casino 斑岩

Cu-Au-Mo 矿床进行对比。Boomeri 等(2009)、Boomeri 等(2010)、Ayati 等(2008)、Parsapoor 等(2015)、Afshooni 等(2013)将 Miduk、Sarcheshmeh、Dalli、Darreh-Zar、Kahang 斑岩铜矿床的卤素逸度比均投于 Selby 等(2000)的 $\log(f(\text{HF})/f(\text{HCl}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ 和 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ 图解(图 9)进行对比分析。从图 9 可以看出,与斑岩铜矿床有关的流体较斑岩铜矿床具有较高的 F/Cl 比值;Dalli、Sarcheshmeh、Kahang、Casino 斑岩矿床的绢英岩化带的黑云母都比钾化带具有更高的 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ 和 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$,可能是由于绢英化带受大气水混合造成的;具有高的 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ 和 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ 可能受后期(?)大气水对黑云母中可交换位置(OH、F、Cl)的影响(Selby et al., 2000; Boomeri et al., 2010; Afshooni et al., 2013)。

7 成矿潜力评价

秦克章等(2009)研究表明,判别斑岩铜矿含矿性主要有以下几方面:与矿化有关的黑云母多富 Mg 而低 Fe, Mg/Fe 一般多 >0.5 ; 矿化黑云母含量 Ti 高, $w(\text{TiO}_2) > 3\%$; 矿化黑云母 $w(\text{Al}) < 15\%$; 矿化黑云母以高 K、低 Na 和 Ca 为特点, $w(\text{CaO}) < 0.5\%$,

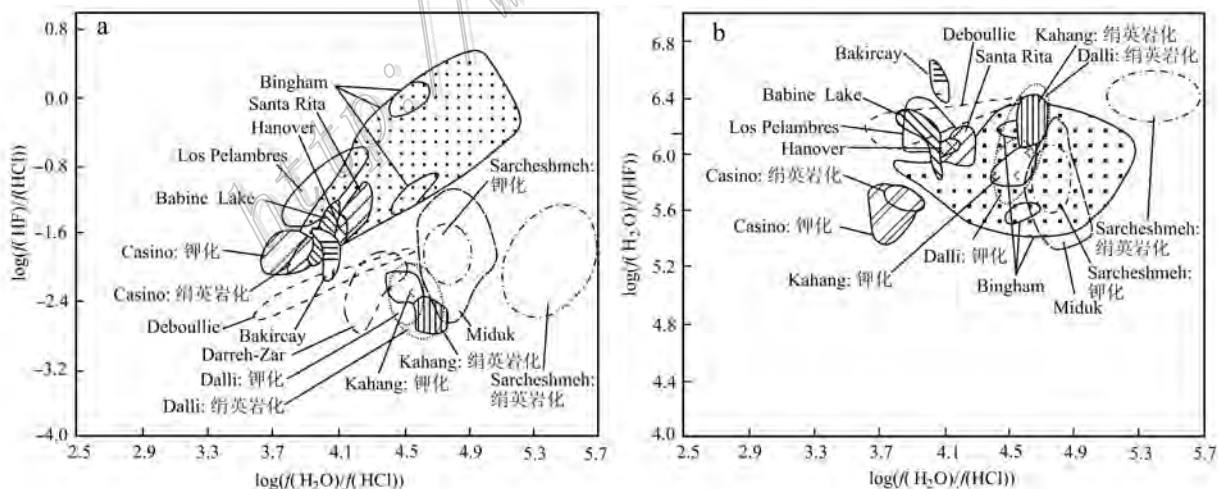


图 9 斑岩矿床黑云母 $\log(f(\text{HF})/f(\text{HCl}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ (a)和 $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ (b)对比图(据 Selby et al., 2000; Boomeri et al., 2009; 2010; Ayati et al., 2008; Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013 修改)

Fig. 9 Comparison of the porphyry systems in terms of (a) $\log(f(\text{HF})/f(\text{HCl}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ and (b) $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HF}))$ - $\log(f(\text{H}_2\text{O})/f(\text{HCl}))$ ratios (modified after Selby et al., 2000; Boomeri et al., 2009; 2010; Ayati et al., 2008; Parsapoor et al., 2015; Afshooni et al., 2013)

K/Na 比值多 >10 ,矿化黑云母中 Ba、Cu 及 F、Cl 等挥发组含量均高于非矿化者。刘彬等(2010)利用黑云母矿物化学研究鄂东南铜山口斑岩铜(钼)矿床的黑云母表明,高氧逸度($\log f(\text{O}_2) > \text{NNO} + 1$)有利于斑岩铜矿的形成,与铜成矿有关的黑云母具有高 Mg、低 Fe 特征。东前等(2011)利用黑云母矿物化学研究江西武山花岗闪长斑岩表明,武山花岗闪长斑岩形成于相对高温较浅环境,具有较大成矿潜力,有利于武山矽卡岩铜矿的形成。许腾等(2015)利用黑云母矿物化学研究河南栾川矿集区燕山期 2 类岩体表明,作为斑岩-矽卡岩型钼多金属矿床成矿母岩的南泥湖、上房沟岩体中的黑云母属于镁质黑云母,结晶深度为 1.4~4.4 km,属于浅成相,并且结晶温度和氧逸度均高于“不成矿”的老君山岩体。武宗林等(2015)利用黑云母矿物化学研究栾川矿集区黄背岭-中鱼库花岗岩表明,黄背岭斑状花岗岩与中鱼库黑云母二长花岗岩形成时的温度与氧逸度均较高,富 F,有利于斑岩型钼钨多金属矿的形成,成矿潜力较大。Zhang 等(2016)利用黑云母矿物化学研究 Sisson Brook W-Mo-Cu 矿床周围的长英质侵入体表明,黑云母花岗质岩脉具有高氧逸度(NNO),而其他岩体氧逸度较低(QFM),并且卤素逸度也与其他斑岩铜矿和 Sn-W-Be 矿床类似, $\text{IV}(\text{F}/\text{Cl})$ 和 $\text{IV}(\text{F})$ 投于斑岩铜矿和 Sn-W-Be 矿床区域,认为仅考虑岩浆的演化程度、氧逸度和卤素含量,黑云母花岗质岩脉有可能是成矿流体的来源。

李鸿莉等(2007a)利用黑云母矿物化学研究芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩表明,从角闪石黑云母花岗岩到黑云母花岗岩,结晶温度和氧逸度明显降低,Cl 含量逐渐减少,随着岩浆的演化,岩浆结晶期后分异出的热液流体向富 Cl、Sn 方向演化,因此,骑田岭黑云母花岗岩与 Sn 成矿具有密切的成因联系。李鸿莉等(2007b)利用黑云母矿物化学研究岩背花岗岩表明,相对于含黄玉黑云母花岗岩,含黄玉花岗斑岩形成温度和氧逸度明显降低,岩浆演化过程中分异出的流体富 F、Sn,与锡成矿关系更密切。陈慧军等(2015)研究滇西古花岗岩中黑云母表明,相对于古永花岗岩体,小龙河花岗岩体形成于相对低温、低氧逸度,具有更大的锡成矿潜力。

陈佑纬等(2010)利用黑云母矿物化学研究贵东岩体表明,相比鲁溪岩体,下庄岩体 F 含量增高,温度和氧逸度降低,使铀在花岗岩中的丰度升高,有利于晶质铀矿形式存在,使其有大量铀矿床产出。章

健等(2011)利用黑云母矿物化学研究华南印支期产铀和非产铀花岗岩表明,与非产铀花岗岩相比,产铀花岗岩具有如下特征:黑云母蚀变程度强,包裹的副矿物较多,黑云母中 SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 含量较低, Al_2O_3 、F、FeO 含量较高;黑云母均为铁叶云母, VIAl^{3+} 、 Fe^{2+} 高;并且花岗岩的氧逸度低、成岩温度低。这些特征是判别华南印支期花岗岩产铀潜力的重要标志。陈佑纬等(2013)利用黑云母矿物化学研究陕南光石沟伟晶岩型铀矿床表明,产铀黑云母伟晶岩中黑云母相对于非产铀黑云母伟晶岩具有富 Mg、Mn,贫 Al、ACNK、低氧逸度的特征。唐傲等(2015)利用黑云母矿物化学研究赣中紫云山岩体含矿花岗岩表明,紫云山花岗岩形成于相对较高的温度和氧逸度环境,属于壳源的 S 型花岗岩,岩体中黑云母具有富 F 的特征,为铀、钨矿的形成提供了有利条件。

Warren 等(2015)研究 Sudbury 杂岩中 Ni-Cu-PGE 矿床表明,黑云母的 Ni-Cr-Cu 含量可以作为与基性-超基性有关的 Ni-Cu-PGE 矿床的找矿指示,相比于成矿后的区域变质形成的黑云母和远离矿化岩体的并且具有异常 Cu 含量的围岩中的黑云母,矿化的岩体黑云母具有显著高的 Ni 和 Ni/Cr。王戴平等(2012)和唐攀等(2016)分别利用激光等离子质谱仪和电子探针研究甲玛斑岩成矿系统黑云母中铜含量,发现热液黑云母中的铜含量较角岩中的原生黑云母和岩浆黑云母高,热液黑云母铜含量对斑岩成矿具有重要的指示作用。

8 存在问题

目前,通过电子探针或离子探针分析获得黑云母的主量成分, Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 OH^- 只能通过计算获得, Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 计算方法常用的有 Dymek(1983)、郑巧荣(1983)和林文蔚等(1994)提出的方法,不同方法计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 对黑云母矿物化学的指示意义及对比研究造成一定的影响。虽然黑云母单矿物分离分析,可以测试出 FeO 和 Fe_2O_3 ,但是不能避免黑云母局部蚀变、含有硫化物和其他矿物包裹体等的巨大影响。黑云母主量成分的离子数基于 22 个氧原子或 $22 + \chi$ (χ 为三价铁离子个数)个正电价估算获得,不同方法获得的离子数对黑云母矿物化学分析评价也具有一定的影响。黑云母中存在微小包体(铜、镍包体等)已被一些学者观察到(Al-Hashimi et

al., 1970; Ilton et al., 1988; 1993; Warren et al., 2015), 在目前的显微观察手段下进行微区原位分析很难避免微小包体对分析结果的影响。黑云母中铜的存在形式和成因尚存在争议, 主要可能是检测技术的精度 (Ilton et al., 1988; 1993)。

9 结论

综上所述, 近年来显微观察和矿物原位微区分析测试精度不断提高, 黑云母矿物化学的研究已经取得较大的进步, 可以得出以下几点结论:

(1) 黑云母是岩浆岩中重要的铁镁质成岩硅酸盐矿物, 既可以形成于侵入体结晶过程, 也可以形成于岩浆热液过程。通过细致的岩相学观察, 再加上精确的原位微区分析, 黑云母化学成分对花岗岩类的岩石成因和构造背景的指示以及评价斑岩矿床岩浆热液演化过程和岩体的成矿潜力是有用且可靠的。这是开展黑云母矿物化学研究的基础。

(2) 黑云母矿物化学可以快速地指示区域中酸性岩浆岩的性质和构造背景, 黑云母的氧逸度、卤素和含铜性等可以作为评价区域上中酸性岩体是否具有斑岩或岩浆热液成矿的潜力的一个重要指标。可以预料, 黑云母矿物化学应用于区域岩体面扫和黑云母矿物化学填图是其未来研究的发展趋势。

(3) 黑云母矿物化学研究能为斑岩型铜多金属矿床或岩浆热液矿床的成矿预测和勘查评价提供最新的找矿矿物学证据。

志 谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Abdel-Rahman A M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magma [J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.
- Abrecht J and Hewitt D A. 1988. Experimental evidence on the substitution of Ti in biotite [J]. *American Mineralogist*, 73: 1275-1284.
- Afshooni S Z, Mirnejad H, Esmaily D and Haroni H A. 2013. Mineral chemistry of hydrothermal biotite from the Kahang porphyry copper deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran [J]. *Ore Geology Reviews*, 54: 214-232.
- Ague J J and Brimhall G H. 1988. Regional variations in bulk chemistry, mineralogy, and the compositions of mafic and accessory minerals in the batholiths of California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 100(100): 891-911.
- 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.
- Ayati F, Yavuz F, Noghreyan M, Haroni H A and Yavuz R. 2008. Chemical characteristics and composition of hydrothermal biotite from the Dalli porphyry copper prospect, Arak, Central Province of Iran [J]. *Mineralogy and Petrology*, 94(1-2): 107-122.
- Barrière M and Cotten J. 1979. Biotites and associated minerals as markers of magmatic fractionation and deuteric equilibration in granites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(2): 183-192.
- Bea F, Yereira M D and Stroh A. 1994. Mineral/leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study) [J]. *Chemical Geology*, 117: 291-312.
- Beane R E. 1974. Biotite stability in the porphyry copper environment [J]. *Econ. Geol.*, 69(2): 241-256.
- Boomeri M, Nakashima K and Lentz D R. 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: A geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 17-29.
- Boomeri M, Nakashima K and Lentz D R. 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: A mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes [J]. *Ore Geology Reviews*, 38(4): 367-381.
- Bowman J R, Parry W T, Kropp W P and Kruer S A. 1987. Chemical and isotopic evolution of hydrothermal solutions at Bingham, Utah [J]. *Econ. Geol.*, 82: 395-428.
- Burkhard D J M. 1993. Biotite crystallization temperatures and redox states in granitic rocks as indicator for tectonic setting [J]. *Geologie en Mijnbouw*, 71(4): 337-349.
- Chen H J, Zhang S T, Cao H W, Wang X F, Nie X L, Zhang W and Tang L. 2015. Compositional characteristics, petrogenesis and metallogenic significance of biotite from granite in the Guyong region of western Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, (2): 267-275 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y W, Bi X W, Hu R Z, Zhu W G, Xu L L and Dong S H. 2010. The geochemical characteristics of biotites and their constraints on uranium mineralization in Guidong pluton [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(4): 355-363 (in Chinese with

- English abstract).
- Chen Y W , Bi X W , Hu R Z , Dong S H , Cheng D J and Feng Z S . 2013 . Mineral chemistry of biotite and its implications for uranium mineralization in Guangshigou pegmatite-type uranium deposit , south Shanxi Province [J] . *J. Mineral Petrol* , 33(4) : 17-28(in Chinese with English abstract) .
- Chivas A R . 1981 . Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization . Part I . mafic silicates from the Koloula igneous complex [J] . *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 78(4) : 389-403 .
- Czarnamanski 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 .
- Czarnamanski G K , Ishihara S and Atkin S A . 1981 . Chemistry of rock forming minerals of the Cretaceous Paleocene batholith in south-western Japan and implications for magma genesis [J] . *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* , 86(11) : 10431-10469 .
- Dahlquist J A , Alasino P H , Eby G N , Galindo C and Casquet C . 2010 . Fault controlled carboniferous A-type magmatism in the proto-Andean foreland (Sierras Pampeanas , Argentina) : Geochemical constraints and petrogenesis [J] . *Lithos* , 115(1) : 65-81 .
- De Albuquerque C A . 1973 . Geochemistry of biotites from granitic rocks , northern Portugal [J] . *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 37(7) : 1779-1802 .
- Dodge F , Smith V C and Mays R E . 1969 . Biotites from granitic rocks of the Central Sierra Nevada batholith , California [J] . *Journal of Petrology* , 10(2) : 250-271 .
- Dong Q , Du Y S , Cao Y , Pang Z S , Song L X and Zheng Z . 2011 . Compositional characteristics of biotites in Wushan granodiorite , Jiangxi Province : Implications for petrogenesis and mineralization [J] . *J. Mineral Petrol* . , 31(2) : 1-6(in Chinese with English abstract) .
- Dymek R F . 1983 . Titanium , aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses , West Greenland [J] . *American Mineralogist* , 68(9-10) : 880-899 .
- Finch A A , Parsons I and Mingard S C . 1995 . Biotite as indicators of fluorine fugacities in late-stage magmatic fluids : The Gardar province of South Greenland [J] . *Journal of Petrology* , 36(6) : 1701-1728 .
- Ford J H . 1978 . A chemical study of alteration at the Panguna porphyry copper deposit , Bougainville , Papua New Guinea [J] . *Econ. Geol.* , 73 : 703-720 .
- Fu J B . 1981 . Chemical composition of biotite in porphyry copper deposits [J] . *Geology and Prospecting* , (9) : 16-19(in Chinese) .
- Grabekzev A I , Vigorova V G and Chashukhina V A . 1979 . Behavior of fluorine during crystallization of granites (in connection with validation of the criteria of granite specialization) [J] . *Geochemistry International* , 16 : 23-33 .
- Guo Y Y , He W Y , Li Z C , Ji X Z , Han Y , Fang W K and Yin C . 2015 . Petrogenesis of Ge'erkuohe porphyry granitoid , western Qinling : Constraints from mineral chemical characteristics of biotites [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 31(11) : 3380-3390(in Chinese with English abstract) .
- Hendry D , Chivas A R , Reed S and Long J . 1981 . Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization . Part II . Ion-probe analysis of Cu contents of mafic minerals , Koloula igneous complex [J] . *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 78(4) : 404-412 .
- Hendry D , Chivas A R , Long J and Reed S . 1985 . Chemical differences between minerals from mineralizing and barren intrusions from some North American porphyry copper deposits [J] . *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 89(4) : 317-329 .
- Henry D J . 2005 . The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites : Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J] . *American Mineralogist* , 90(2-3) : 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) : 149-164(in Chinese with English abstract) .
- Hu J , Qiu J S , Wang R C , Jiang S Y , Zing H F and Wang X L . 2006 . Zircon U-Pb geochronology , biotite mineral chemistry and their petrogenetic implications of the Longwo and Baishigang plutons in Guangdong Province [J] . *Acta Petrologica Sinica* , 22(10) : 2464-2474(in Chinese with English abstract) .
- Ilton E S and Veblen D R . 1988 . Copper inclusions in sheet silicates from porphyry Cu deposits [J] . *Nature* , 334(6182) : 516-518 .
- Ilton E S and Veblen D R . 1993 . Origin and mode of copper enrichment in biotite from rocks associated with porphyry copper deposits : A transmission electron microscopy investigation [J] . *Econ. Geol.* , 88(4) : 885-900 .
- 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 Y , Jiang S , Ling H , Zhou X , Rui X and Yang W . 2002 . Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun

- orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: Implications for granitoid genesis [J]. *Lithos*, 63(3): 165-187.
- Karimpour M H, Stern C R and Mouradi M. 2011. Chemical composition of biotite as a guide to petrogenesis of granitic rocks from Maherabad, Dehnow, Gheshlagh, Khajehmourad and Najmabad, Iran [J]. *Iranian Society of Crystallography and Mineralogy*, 18: 89-100.
- Lai S C, Yi H S and O'Reilly S Y. 2002. Geochemistry of biotite of the Cenozoic volcanic rock series from north Qiangtang, Tibetan plateau and its petrological implication [J]. *Progress in Natural Science*, 12(3): 311-314 (in Chinese).
- Lalonde A. 1993. Composition and color of biotite from granites two useful properties in the characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay Orogen, northwest [J]. *Canadian Mineralogist*, 31: 203-217.
- Lanier G, Raab W J, Folsom R B and Cone S. 1978. Alteration of equigranular monzonite, Bingham mining district, Utah [J]. *Econ. Geol.*, 73(7): 1270-1286.
- Li H L, Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Shuang Y, Li Z L, Li X M and Yuan S D. 2007a. 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 H L, Bi X W, Tu G C, Hu R Z, Pen J T and Wu K X. 2007b. Mineral chemistry of biotite from yanber pluton: Implication for Sn-metallogeny [J]. *J. Mineral Petrol.*, 27(3): 49-54 (in Chinese with English abstract).
- Lin W W and Peng L J. 1994. The estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in amphibole and biotite from EMPA data [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155-162 (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 L J and Wang J C. 1984. The formative mechanism of biotitization-biotite-recrystallization in granitoid and its geological significance [J]. *Geotecnica et Metallogenia*, 8(4): 369-375 (in Chinese with English abstract).
- Loferski P J and Ayuso R A. 1995. Petrography and mineral chemistry of the composite Deboullie pluton, northern Maine, USA: Implications for the genesis of Cu-Mo mineralization [J]. *Chemical Geology*, 123(1): 89-105.
- Lou Y E and Du Y S. 2006. Characteristics and genesis of biotites from the Mesozoic intrusive rocks in the Fanchang-Tongling area, Anhui Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(2): 175-180 (in Chinese with English abstract).
- Mi J R, Yuan S D, Yuan Y B and Xuan Y S. 2014. Mineral chemistry of biotites in Baoshan granodiorite-porphry, southern Hunan Province: Implications for petrogenesis and mineralization [J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1357-1365 (in Chinese with English abstract).
- Moore W J and Czamanske G K. 1973. Compositions of biotites from unaltered and altered monzonitic rocks in the Bingham Mining District, Utah [J]. *Econ. Geol.*, 68(2): 269-274.
- Munoz J L. 1984. F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposit [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 13(1): 469-493.
- Munoz J L. 1992. Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: Revised equation [J]. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 24: A221.
- Nachit H, Razafimaha N, Stussi J M and Carron J P. 1985. Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoïdes [J]. *Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des sciences*, 301(11): 813-818.
- Nachit H, Ibhi A, Abia E H and Ben O M. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites and neoformed biotites [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16): 1415-1420.
- Neiva A R. 1981. Geochemistry of hybrid granitoid rocks and of their biotites from central northern Portugal and their petrogenesis [J]. *Lithos*, 14(2): 149-163.
- Neves L J P F. 1997. Trace element content and partitioning between biotite and muscovite of granitic rocks: A study in the Viseu region (Central Portugal) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9: 849-857.
- Niu X L, Yang J S, Feng G Y and Liu F. 2015. Mineral chemistry of biotites from the Fanshan ultramafic-syenitic complex from the Fanshan and its petrogenetic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1108-1119 (in Chinese with English abstract).
- Parry W T, Ballantyne G H and Wilson J C. 1978. Chemistry of biotite and apatite from a vesicular quartz latite porphyry plug at Bingham, Utah [J]. *Econ. Geol.*, 73: 1308-1314.
- Parsapour A, Khalili M, Tepley F and Maghami M. 2015. Mineral chemistry and isotopic composition of magmatic, re-equilibrated and hydrothermal biotites from Darreh-Zar porphyry copper deposit, Kerman (southeast of Iran) [J]. *Ore Geology Reviews*, 66: 200-218.

- Patino Douce A E. 1993. Titanium substitution in biotite : An empirical model with applications to thermometry , O_2 and H_2O barometers , and consequence for biotite stability[J]. *Chemical Geology* , 108 : 132-162.
- 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).
- Rieder M , Cavazzini G , D 'Yakovov Y S , Frank-Kamenetskii V A , Gottardi G , Guoggenheim S , Koval P V , Muller G , Neiva A M R , Radoslovich E W , Robert J L , Sssi F P , Takeda H , Weiss Z and Wones D R. 1998. Nomenclature of the micas[J]. *The Canadian Mineralogist* , 36 : 41-48.
- Robert J L. 1976. Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solution[J]. *Chemical Geology* , 17(3) : 213-227.
- Sallet R. 2000. Fluorine as a tool in the petrogenesis of quartz-bearing magmatic associations : Applications of an improved F-OH biotite-apatite thermometer grid[J]. *Lithos* , 50(1-3) : 241-253.
- Sarjoughian F , Kananian A , Ahmadian J and Murata M. 2015. Chemical composition of biotite from the Kuh-e Dom pluton , Central Iran : Implication for granitoid magmatism and related Cu-Au mineralization[J]. *Arabian Journal of Geosciences* , 8(3) : 1521-1533.
- Selby D and Nesbitt B E. 2000. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization , Yukon , Canada : Evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry[J]. *Chemical Geology* , 171(1-2) : 77-93.
- Shabani A A , Lalonde A E and Whalen J B. 2003. Composition of biotite from granitic rocks of the Canadian Appalachian orogen : A potential tectonomagmatic indicator[J]? *The Canadian Mineralogist* , 41(6) : 1381-1396.
- Siahcheshm K , Calagari A A , Abedini A and Lentz D R. 2012. Halogen signatures of biotites from the Maher-Abad porphyry copper deposit , Iran : Characterization of volatiles in syn-to post-magmatic hydrothermal fluids[J]. *International Geology Review* , 54(12) : 1353-1368.
- Smith V C , Pearce N J , Matthews N E , Westgate J A , Petraglia M D , Haslam M , Lane C S , Korissetar R and Pal J. 2011. Geochemical fingerprinting of the widespread Toba tephra using biotite compositions[J]. *Quaternary International* , 246(1-2) : 97-104.
- Speer J A. 1981. Petrology of cordierite-and almandine-bearing granitoid plutons of the southern Appalachian Piedmont , USA[J]. *Canadian Mineralogist* , 19 : 35-46.
- 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.
- Tang A , Li G L , Zhou L Q and Su Y. 2015. Compositional characteristics of biotite in Ziyunshan ore bearing granite , Central Jiangxi : Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *J. Mineral Petrol.* , 35(1) : 29-34.
- Tang P , Chen Y C , Tang J X , Zheng W B , Leng Q F , Lin B and Fang X. 2016. Typomorphic characteristics and geological significance of biotites in Jiama porphyry deposit system , Tibet[J]. *Mineral Deposits* , 35(4) : 846-866(in Chinese with English abstract).
- Tao J H , Cen T , Long W G and Li W X. 2015. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints petrogenesis[J]. *Earth Science Frontiers* , 22(2) : 64-78(in Chinese with English abstract).
- Taylor R P. 1983. Comparison of biotite geochemistry of Bakircay , Turkey , and Los Pelambres , Chile , porphyry copper systems[J]. *Institution of Mining and Metallurgy Transactions* , 92 : 16-22.
- Uchida E , Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resource Geology* , 57(1) : 47-56.
- 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 Geoscientica Sinica* , 33(4) : 444-458(in Chinese with English abstract).
- Wang X X and Lu X X. 1998. A study of biotite from the Shahewan Rapakivi granite in Qinling and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 17(4) : 352-358(in Chinese with English abstract).
- Warren M R , Hanley J J , Ames D E and Jackson S E. 2015. The Ni-Cr-Cu content of biotite as pathfinder elements for magmatic sulfide exploration associated with mafic units of the Sudbury igneous complex , Ontario , Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration* , 153 : 11-29.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite-experiment theory and application[J]. *American Mineralogist* , 50(9) : 1228.
- Wu Z L , Zhang S T , Xu T , Cao H W , Pei Q M , Deng M Z , Tang C H and Zhang P. 2015. Compositional characteristics , petrogenesis and metallogenetic significance of biotite from granite in the Huangbeiling-Zhongyuku region of Luanchuan ore concentration area[J]. *J. Mineral Petrol.* , 35(3) : 11-19(in Chinese with English abstract).
- Xiong X L , Shi M Q and Chen F R. 2001. Biotite as a tracer of Cu and

- Au mineralization in hypergene-subvolcanic plutons[J]. Mineral Deposits, 21(2): 107-111(in Chinese with English abstract).
- Xu K Q and Tu G C. 1986. Relationship between granitic rocks and mineralization[M]. Nanjing: Science and Technology of Jiangsu Press. 1-64(in Chinese).
- Xu T, Zhang S T, Yang B, Cao H W, Zhang Y H, Pei Q M, Zhang P, Tang C H and Wu Z L. 2015. Characteristics of biotites in two types of Yanshanian granitic pluton in Luanchuan ore concentration area of China and its significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 42(3): 257-267 (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).
- Yavuz F. 2003a. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: Part II -Applications using the computer program Mica+[J]. Computers & Geosciences, 29(10): 1215-1228.
- Yavuz F. 2003b. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: I-definitions and structure of the computer program MICA+[J]. Computers & Geosciences, 29(10): 1203-1213.
- Zhang J, Chen W F and Chen P R. 2011. Compositional differences of the biotites from the uranium-forming and non uranium-forming Indosinian granites in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 270-277(in Chinese with English abstract).
- Zhang P P and Zhu Z X. 1991. The mineralogical characteristics of biotites in granite and its genetic significance in central and southern Daxinganling mountains[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 21(3): 307-312(in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Lentz D R, Thorne K G and McFarlane C. 2016. 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 Geology Reviews, 77: 82-96.
- 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, 3(1): 55-62(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z X. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Provind[J]. Acta Petrologica Sinica, 2(1): 59-70 (in Chinese with English abstract).
- Zhu C and Sverjensky D A. 1991. Partitioning of F-Cl-OH between minerals and hydrothermal fluid[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(7): 1837-1858.
- Zhu C and Sverjensky D A. 1992. F-Cl-OH partitioning between biotite and apatite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(9): 3435-3467.
- ### 附中文参考文献
- 陈慧军,张寿庭,曹华文,王祥发,聂晓亮,张伟,唐利. 2015. 滇西古永地区花岗岩中黑云母成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物学报, 2015, (2) 267-275.
- 陈佑纬,毕献武,胡瑞忠,朱维光,胥磊落,董少花. 2010. 贵东岩体黑云母成分特征及其对铀成矿的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(4): 355-363.
- 陈佑纬,毕献武,胡瑞忠,董少花,程德进,冯张生. 2013. 陕南光石沟伟晶岩型铀矿床黑云母矿物化学研究及其对铀成矿的启示[J]. 矿物岩石, 33(4): 17-28.
- 东前,杜杨松,曹毅,庞振山,宋林旭,郑震. 2011. 江西武山花岗岩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, 31(2): 1-6.
- 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.
- 郭耀宇,和文言,李在春,戢兴忠,韩愉,房维科,殷超. 2015. 西秦岭格爾括合花岗岩闪长斑岩岩石成因:黑云母矿物学特征约束[J]. 岩石学报, 31(11) 3380-3390.
- 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, 55(5): 149-164.
- 胡建,邱检生,王汝成,蒋少涌,凌洪飞,王孝磊. 2006. 广东龙窝和白石岗岩体锆石 U-Pb 年代学、黑云母矿物化学及其成岩指示意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2464-2474.
- 赖绍聪,伊海生,刘池阳, O'Reilly S Y. 2002. 青藏高原北羌塘新生代火山岩黑云母地球化学及其岩石学意义[J]. 自然科学进展, 12(3): 311-314.
- 李鸿莉,毕献武,胡瑞忠,彭建堂,双燕,李兆丽,李晓敏,袁顺达. 2007a. 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.
- 李鸿莉,毕献武,涂光焯,胡瑞忠,彭建堂,吴开兴. 2007b. 岩背花岗岩黑云母矿物化学研究及其对成矿意义的指示[J]. 矿物岩石, 27(3): 49-54.
- 林文蔚,彭丽君. 1994. 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, 24(2): 155-162.
- 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.
- 刘立钧,王均灿. 1984. 花岗岩类中黑云母化-黑云母重结晶作用的形成机理及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 8(4): 369-375.
- 楼亚儿,杜杨松. 2006. 安徽繁昌-铜陵中生代侵入岩的黑云母特征

- 和成因探讨[J]. 矿物学报, 2(2):175-180.
- 弥佳茹,袁顺达,原垭斌,轩一撒. 2014. 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, 33(6):1357-1365.
- 牛晓露,杨经绥,冯光英,刘飞. 2015. 河北矾山超镁铁岩-正长岩杂岩体中黑云母的特征及其成岩指示意义[J]. 地质学报, 89(6):1108-1119.
- 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.
- 唐傲,李光来,周龙全,苏晔. 2015. 赣中紫云山岩体含矿花岗岩黑云母成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 35(1):29-34.
- 唐攀,陈毓川,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林彬,方向. 2016. 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, 36(1):846-866.
- 陶继华,岑涛,龙文国,李武显. 2015. 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]. 地学前缘, 22(2):64-78.
- 王崴平,唐菊兴,应立娟. 2012. 甲玛铜多金属矿床角闪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.
- 王晓霞,卢欣祥. 1998. 秦岭沙河湾环斑花岗岩中黑云母的研究及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 17(4):352-358.
- 武宗林,张寿庭,许腾,曹华文,裴秋明,邓铭哲,唐灿辉,张鹏. 2015. 栾川矿集区黄背岭-中鱼库花岗岩中黑云母成分特征及成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 35(3):11-19.
- 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.
- 徐克勤,涂光炽. 1986. 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京:江苏科学技术出版社. 1-645
- 许腾,张寿庭,杨冰,曹华文,张云辉,裴秋明,张鹏,唐灿辉,武宗林. 2015. 河南栾川矿集区燕山期两类岩体黑云母特征对比及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 42(3):257-267.
- 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.
- 张培萍,朱钟秀. 1991. 大兴安岭中南段花岗岩中黑云母的矿物学研究及成因意义[J]. 长春地质学院学报, 21(3):307-312.
- 章健,陈卫锋,陈培荣. 2011. 华南印支期产铀和非产铀花岗岩黑云母矿物化学成分差异[J]. 大地构造与成矿学, 35(2):270-277.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 3(1):55-62.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1):59-70.