

# 安徽金寨县沙坪沟钼矿成矿岩体矿物学特征 及其成岩成矿意义

阳 珊<sup>1</sup>, 姜章平<sup>2,3</sup>, 袁晓玲<sup>1</sup>, 王 枫<sup>1</sup>, 张 青<sup>1</sup>, 遇 祯<sup>1</sup>

(1. 安徽省地质实验研究所, 安徽 合肥 230001; 2. 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽 铜陵 244033;  
3. 安徽省地矿矿业发展有限公司, 安徽 合肥 230001)

**摘 要:** 安徽金寨县沙坪沟钼矿成矿岩体主要包括二长花岗斑岩、正长斑岩及花岗斑岩, 主要矿物组成为石英、钾长石、斜长石、黑云母。本文利用电子探针技术对主要矿物的矿物学特征进行了研究, 结果表明, 岩石中斜长石为钠长石、钾长石以条纹长石为主, 黑云母属于镁质黑云母, 富 Mg、Al、K, 贫 Ca, MF 值变化于 0.65~0.72 之间。黑云母化学成分显示本区岩体为 I 型花岗岩, 属于造山带钙碱性花岗岩类, 其成岩物质具壳幔混合的特点。黑云母矿物温压计计算结果显示, 岩体固结温度约 500~580℃, 氧逸度变化范围是  $10^{-14}$ ~ $10^{-15.8}$ , 其含铁指数对寻找钼矿具较好的指示意义。

**关键词:** 沙坪沟钼矿; 成矿岩体; 成岩成矿意义; 矿物学特征; 电子探针分析

中图分类号: P588.13; P618.65; P57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0243-12

## Mineralogy of ore-hosting intrusions of the Shapinggou molybdenum deposit in Jinzhai County of Anhui Province and its implications for petrogenesis and mineralization

YANG Shan<sup>1</sup>, JIANG Zhang-ping<sup>2,3</sup>, YUAN Xiao-ling<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup> and YU Zhen<sup>1</sup>

(1. Anhui Geological Experiment Institute, Hefei 230001, China; 2. No. 321 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Tongling 244033, China; 3. Anhui Geological Prospecting and Mining Development Co., Ltd., Hefei 230001, China)

**Abstract:** The Shapinggou molybdenum deposit in Jinzhai County of Anhui Province is situated in the Qinling-Dabie orogenic belt, with mineralization substantially hosted in monzonitic granite porphyry, syenite porphyry and granite porphyry. Microscopic observation shows that the rocks mainly consist of plagioclase, potassium feldspar, biotite and quartz. With these minerals as the study objects, the authors used electron microprobe technology to analyze their mineralogical characteristics, and the results show that, in the rocks, the plagioclase is albite, K-feldspar is mainly perthite, and biotite is Mg-biotite rich in Mg, Al and K and depleted in Ca, with MF changing from 0.65 to 0.72. Chemical composition of biotite suggests that the intrusion is I-type granite, which is a sort of calc-alkali orogenic granite, materially sourced from both the crust and the mantle. Biotite geothermometer and geobarometer imply that the intrusion was consolidated at 500~580℃, with the oxygen fugacity ranging from  $10^{-14}$  to  $10^{-15.8}$  and the iron index being a good indicator for molybdenum mineralization.

**Key words:** Shapinggou molybdenum deposit; ore-hosting intrusions; petrogenetic and metallogenetic implications; mineralogy; electron microprobe analysis

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-08-06

基金项目: 安徽省地质矿产勘查局科研项目(地科便【2010】23号)

作者简介: 阳 珊(1965-), 女, 汉族, 学士, 高级工程师, 主要从事矿物学、岩石学研究, E-mail: 743314337@qq.com.

秦岭-大别造山带是我国重要的斑岩型钼矿成矿区之一,该造山带中生代岩浆活动强烈,近年来斑岩型钼矿找矿勘查获得重大突破,尤其是河南罗山、商城汤家坪、光山千鹤冲及安徽金寨沙坪沟等大型-特大型斑岩型钼矿的发现,显示该造山带斑岩型钼矿成矿潜力巨大。

位于大别带东段的沙坪沟斑岩型钼矿是在2007年前后由安徽省地矿局313地质队发现的。前人对该矿进行了初步研究,与成矿作用密切相关的岩体研究集中以下方面:①对银山地区岩浆岩中黑云母和角闪石单矿物的Ar-Ar定年结果显示,中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩和细晶闪长岩脉分别形成于 $136.8 \pm 1.6$ 、 $130.4 \pm 1.2$ 和 $125.4 \pm 1.0$  Ma(徐晓春等,2009);对矿区含矿岩体中粒石英正长岩、细粒石英正长岩和正长斑岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析,结果显示这3种含矿岩体分别形成于 $121.5 \pm 1.3$ 、 $122.5 \pm 0.81$ 和 $120.7 \pm 1.1$  Ma(孟祥金等,2012)。这些年龄均显示该钼矿床斑岩体形成于燕山晚期早白垩世,为同一期岩浆活动产物,正长斑岩形成时期略晚。②岩体中石英包裹体研究结果显示,从成矿早阶段到主成矿阶段及至成矿晚期均一温度逐渐降低(分别为422、333、296和255℃),成矿流体早期富含CO<sub>2</sub>而晚期仅含水蒸气(于文等,2012)。但对其矿物学特征研究甚少。岩石中主要造岩矿物长石、黑云母、石英等矿物的成分变化可以对岩浆的起源及演化有指示意义,同时能够限定母岩形成时物理化学条件(张东阳等,2009;庞阿娟等,2012)。尤其是黑云母,作为花岗岩类岩石中分布最广泛的镁铁矿物,其化学成分特征能提供有关岩浆起源、岩石成因类型、岩石构成环境、成岩成矿物理化学条件、后期热液作用及成矿元素富集等重要信息(吕志成等,2003;蒋国豪等,2005;李鸿莉等,2007a;刘彬等,2010;Afshooni *et al.*, 2013)。因此,本文将对沙坪沟斑岩的矿物特征进行研究,旨在为钼矿的成因等提供矿物学方面的依据。

## 1 矿区地质概况

安徽省金寨县沙坪沟钼矿床位于秦岭-大别造山带北侧,北淮阳构造带东段(安徽段)的西部,近东西向桐柏-桐城断裂带与近南北向商城-麻城断裂带交汇部位的北东侧。矿体受斑岩体和控岩构造控

制。区域出露地层为中元古界卢镇关(岩)群(苏家河群、红安群)、新元古界-下古生界佛子岭(岩)群(信阳群)、石炭系杨山群以及中生界-新生界未变质的陆相盆地堆积。矿区发育近EW向与NE向2组构造。区内元古宙、古生代和中生代火山活动和岩浆侵入广泛发育,燕山期形成与成矿关系密切的钙碱性及碱性系列岩浆岩(张怀东等,2012)(图1)。

## 2 矿床地质特征

沙坪沟钼矿床赋存在隐伏花岗斑岩体与石英正长岩的接触带中(张怀东等,2010a),富矿体主要分布在花岗斑岩体的顶部。矿区出露地层主要为中元古界卢镇关(岩)群变火山-沉积岩,岩性为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩等。区内强烈的岩浆侵入作用使该地层呈残留体产出于矿区的西部与北部,主要岩性为角闪斜长片麻岩和少量花岗片麻岩。区内断裂构造发育,主要控矿构造为NWW向桐柏-桐城断裂,其次发育NE及NW向断裂。矿区内中生代岩浆岩发育广泛,岩性以中细粒二长花岗岩为主,其次为花岗闪长岩、石英正长岩、闪长岩等,多与多金属矿化无关。经钻探验证,沙坪沟钼矿为石英正长(斑)岩体下部的隐伏矿床,与钼矿化关系密切的岩体主要由(黑云母)花岗斑岩、(黑云母)二长花岗(斑)岩等组成(张怀东等,2010b;张红等,2011;黄凡等,2011)。矿石中金属矿物主要为辉钼矿,其次为黄铁矿,含少量的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉铜矿、磁黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿、白钨矿等,脉石矿物主要为钾长石,其次为斜长石、钠长石、绢云母、白云母、黑云母、绿泥石、绿帘石等;近矿围岩蚀变为钾长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化等。矿石为自形-半自形鳞片结构、他形-半自形晶粒状结构,星散浸染状构造或细脉浸染状构造。

## 3 岩体岩相学特征

本次研究样品的采集对象主要是与成矿作用密切相关的岩石,以花岗斑岩为主,含部分(黑云母)二长花岗(斑)岩、正长(斑)岩。矿区整体蚀变较强,笔者对以上不同类型岩石进行系统采样,选取未蚀变或蚀变较弱的样品进行光薄片鉴定及矿物化学分析。经过较为详细的手标本及显微镜观察,其岩相学特征如下。

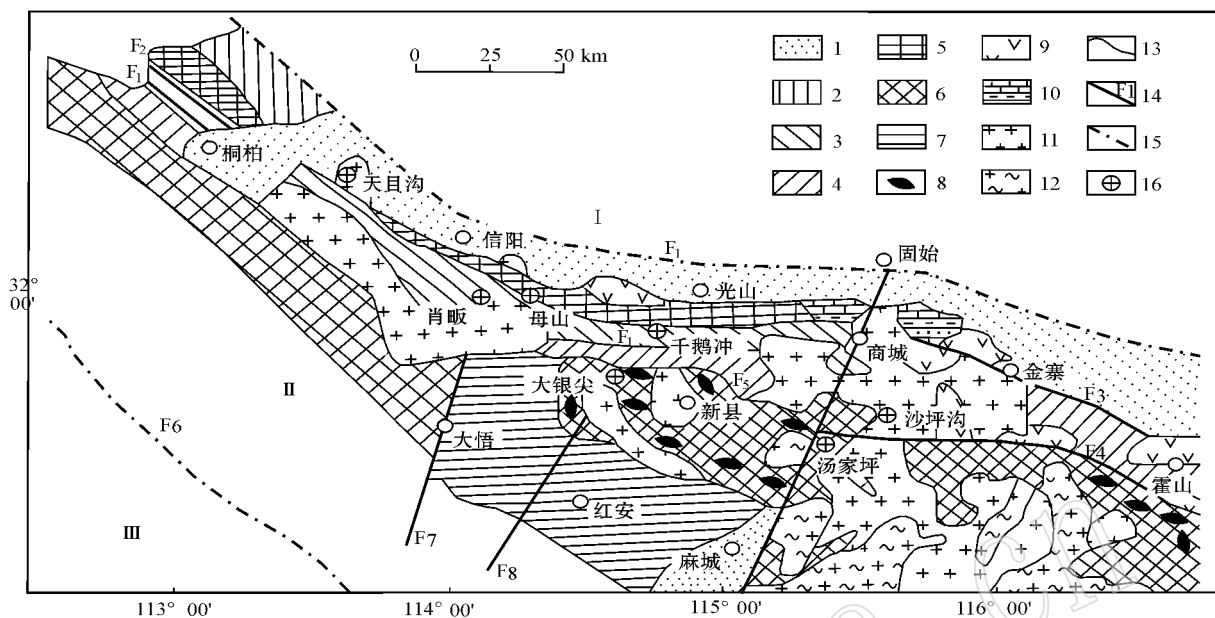


图 1 大别造山带地质略图(底图据孟祥金等,2012)

Fig. 1 Geological sketch map of the Dabie orogenic belt (after Meng Xiangjin et al., 2012)

1—中生代地层(K-E);2—二郎坪群(Pt<sub>3</sub>-Pz);3—龟山岩组(Pt<sub>2</sub>g)、南湾组(Dn);4—肖家庙岩组(Z-O<sub>x</sub>);5—秦岭岩群(Pt<sub>2</sub>qn);6—桐柏-大别变质杂岩(Ar<sub>3</sub>-Pt<sub>1</sub>);7—红安岩群(Pt<sub>3</sub>);8—榴辉岩;9—白垩纪火山岩(K);10—石炭系;11—燕山期花岗岩;12—晋宁期花岗岩;13—地质界线;14—断裂带;15—大别造山带边界;16—钼矿床位置;I—华北地块;II—大别造山带;III—扬子地块

1—Mesozoic-Cenozoic strata (K-E); 2—Erlangping Group (Pt<sub>3</sub>-Pz); 3—Guishan Formation Complex (Pt<sub>2</sub>g), Nanwan Formation (Dn); 4—Xiaojiamiao Formation Complex (Z-O<sub>x</sub>); 5—Qinling Group Complex (Pt<sub>2</sub>qn); 6—Tongbai-Dabie metamorphic complex (Ar<sub>3</sub>-Pt<sub>1</sub>); 7—Hong'an Group Complex (Pt<sub>3</sub>); 8—eclogite; 9—Cretaceous volcanic rock (K); 10—Carboniferous; 11—Yanshanian granite; 12—Jinningian granite; 13—geological boundary; 14—faulted zone; 15—boundary of Dabie orogenic belt; 16—molybdenum deposit; I—North China block; II—Dabie orogenic belt; III—Yangtze block

### 3.1 (黑云母)花岗斑岩

(黑云母)花岗斑岩呈肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶主要有斜长石(3%~30%)、钾长石(5%~30%)、石英(4%~15%)、黑云母(1%~5%),斑晶总含量约占15%~65%。斜长石呈自形-半自形板状,粒径0.3~2 mm,聚片双晶细密,局部发育泥化、绢云母化,有的斑晶被基质中细小石英交代呈穿孔状,有的被钾长石斑晶交代呈残余,钾长石多呈半自形板状,粒径0.3~2.5 mm,由正长石、条纹长石组成,局部泥化,有的斑晶中包裹斜长石残余,部分被基质中的长石、石英沿其晶内交代;石英呈他形粒状,粒径0.3~2.5 mm,多被基质中的长石、石英交代呈穿孔状,部分石英斑晶具加大边结构;黑云母呈不完整叶片状,粒径0.3~1.5 mm,部分被绿泥石交代呈假象,沿解理缝填充大量钛铁氧化物颗粒。基质含量35%~85%,半自形-他形粒状板状,粒径0.05~0.2 mm,以钾长石、石英为主,其次为斜长

石,黑云母次之。钾长石含量约15%~35%,石英含量约10%~30%,斜长石含量约0~13%,黑云母含量约1%~5%。副矿物有磷灰石、磁铁矿、榍石、锆石等,含量<5%(图2a、2d)。

### 3.2 二长花岗(斑)岩

二长花岗(斑)岩呈灰色,不等粒他形粒状结构或似斑状结构,块状构造。矿物成分为钾长石(25%~50%)、斜长石(22%~45%)、石英(20%~30%)、黑云母(1%~15%)。钾长石由正长石、显微条纹长石组成,他形粒状,粒径变化范围大0.02~4.5 mm,表面可见弱泥化现象,部分钾长石为斑晶内部包裹多颗细小斜长石及其残余,斜长石呈他形粒状-半自形板状,粒径0.03~1.5 mm,内含少量次生绢云母、方解石、泥质质点,有的被钾长石交代呈残余、骸晶,部分呈斑晶;石英呈他形粒状镶嵌分布于长石之间,粒径0.01~1.5 mm,内含大量气液包体;黑云母呈叶片状,粒径0.1~0.8 mm,部分被绿泥石交代呈

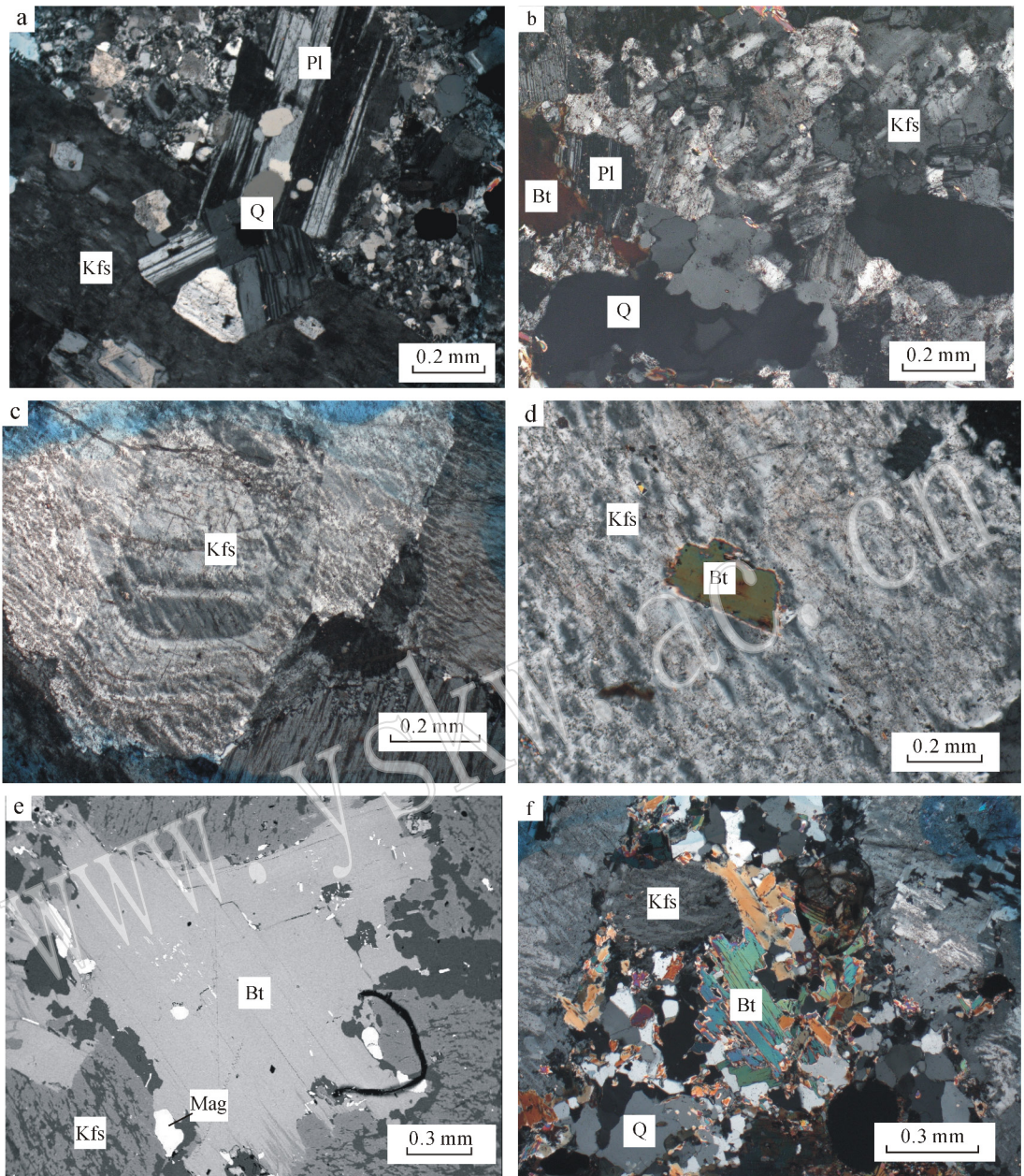


图 2 含矿岩体手标本及显微照片

Fig. 2 Microscopic photos of hand specimen from ore-bearing intrusion

a—花岗岩斑岩中钾长石斑晶具卡氏双晶，斜长石斑晶具聚片双晶，正交偏光(样品 13TP840)；b—二长花岗岩中斜长石呈半自形板状，具聚片双晶，黑云母呈半自形片状，钾长石呈他形，具条纹，正交偏光(样品 10gb65)；c—正长岩中钾长石具环带及条纹结构，正交偏光(样品 13TP842)；d—花岗岩斑岩中钾长石斑晶中包裹黑云母，正交偏光(样品 13TP843)；e—正长斑岩中钾长石颗粒间分布的黑云母，BSE 图像(样品 13TP839)；f—正长岩中略褪色的黑云母，正交偏光(样品 13TP844)

a—granite porphyry: potassium feldspar phenocrysts with Carlsbad twins and plagioclase phenocrysts with polysynthetic twins (in sample 13TP840) observed under crossed nicols; b—monzonitic granite: subhedral tabular plagioclase with polysynthetic twins; subhedral platy biotite; and anhedral striped potassium feldspar (from sample 10gb65), observed under crossed nicols; c—syenite: potassium feldspar with girdle and stripe in texture (from sample 13TP842), observed under crossed nicols; d—granite porphyry: potassium feldspar phenocrysts with biotite inclusions (from sample 13TP843) observed under crossed nicols; e—syenite porphyry: biotites dispersed between potassium feldspar grains (from sample 13TP839) of BSE image; f—syenite: slightly decoloration biotite (from sample 13TP844) observed under crossed nicols

残余,沿解理缝填充少量钛铁氧化物颗粒。副矿物有磷灰石、锆石、榍石、金红石、磁铁矿等,含量 $<1\%$ (图 2b)。

### 3.3 正长(斑)岩

正长(斑)岩呈肉红色,他形粒状或(似)斑状结构,块状构造。矿物成分为钾长石(56%~75%)、斜长石(3%~25%)、石英(3%~15%)、黑云母(5%~15%)。钾长石由正长石、条纹长石组成,他形粒状、板状,粒径 0.2~7 mm,石英、钠长石与少量绿泥石沿其边部、内部交代,有的被交代呈残余,部分钾长石为斑晶,内部包裹小颗粒斜长石。斜长石半自形板状-粒状,粒径 0.03~3 mm,多被钾长石交代呈残余状包于钾长石内,微量绢云母沿其晶内交代,部分斜长石为斑晶,边缘被钾长石交代,中心有微量绢云母交代。黑云母呈叶片状,粒径 0.1~1.5 mm,部分被次生黑云母与少量的石英、白云母等矿物集合体交代呈假像,并析出钛铁氧化物质点,部分黑云母为斑晶。石英呈他形粒状分布于其他矿物颗粒间。副矿物金红石、磷灰石、锆石、榍石、褐帘石等,含量 $<1\%$ (图 2c、2e、2f)。

## 4 造岩矿物特征及化学成分

本次实验样品采自花岗斑岩、二长花岗岩、正长岩,对斜长石、钾长石及不同产状的黑云母进行电子探针分析。分析测试在安徽省地质实验研究所进行,测试仪器为日本岛津公司生产的 EPMA-1720 电子探针,分析条件为加速电压 20 kV,束流  $2 \times 10^{-8}$  A,束斑 5  $\mu\text{m}$ ,修正方法 ZAF,依据方法为电子探针定量分析方法通则 GB/T 15074-2008,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析误差小于 0.01%。

### 4.1 斜长石

斜长石为沙坪沟钼矿岩体的主要浅色造岩矿物之一,主要以斑晶和基质两种形式存在于岩体中。对不同岩性中斜长石进行的电子探针分析结果(表 1)显示,斑晶和基质中斜长石的成分大致相当,其端员组分 Ab 含量在 89.88%~99.35% 之间,平均 95.89%;An 含量为 0.05%~8.88%,平均 3.31%;Or 含量为 0.26%~1.24%,平均 0.80%(表 1,图 3a)。电子探针结果显示,斜长石为钠长石。一般偏酸性岩浆岩中斜长石以更长石为主,含少量中长石、钠长石。本区的斜长石均为钠长石表明该区可能普遍存在岩浆期后钠长石化或岩浆期间混染作用,需

进一步研究确认。

### 4.2 钾长石

钾长石为沙坪沟钼矿岩体的主要浅色造岩矿物之一,主要以斑晶和基质两种形式存在于岩体中。由电子探针分析结果(表 2)看出,钾长石中不含 CaO(0.00%),端员组分 Or 含量为 81.40%~98.10%,平均 92.11%;Ab 含量为 1.90%~18.60%,平均 7.89%。电子探针结果显示,本区钾长石为透长石。对正长岩中条纹长石的环带进行电子探针分析,发现环带中心钾长石 Or 含量为 96.18%,Ab 含量为 3.82%,其中的钠长石条纹 Ab 含量 96.61%,Or 含量为 2.29%,An 含量为 1.1%,环带边部钾长石 Or 含量为 81.40%,Ab 含量为 18.6%,其中的钠长石条纹 Ab 含量 98.60%,Or 含量 1.07%,An 含量为 0.33%,表明该正长岩可能后期受到弱钠质蚀变。

### 4.3 黑云母

黑云母在沙坪沟钼矿岩体中常见,主要存在 3 种产状的黑云母,分别是钾长石斑晶中的黑云母、赋存于矿物颗粒之间的黑云母以及略褪色的黑云母。结合黑云母的电子探针分析结果(表 3),并计算阳离子数,在黑云母分类图解中(图 3b)这 3 种产状的黑云母均为镁质黑云母,其中略褪色的黑云母成分相对更接近金云母,可能是由于受到后期流体的改造。经计算发现钾长石斑晶内的黑云母  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  比值为 0.25~0.27,赋存于矿物颗粒间的黑云母  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  比值为 0.25~0.28,而略褪色的黑云母  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  比值则为 0.19~0.23,相对前 2 种产状黑云母其  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  比值不均一,同样表明了略褪色的黑云母遭受了后期流体的改造(Stone, 2000;李鸿莉等, 2007b;刘彬等, 2010)。

对比 3 种不同产状的黑云母发现,赋存于矿物颗粒间的黑云母具相对富铁贫镁的特征,略褪色的黑云母相对富镁贫铁,钾长石斑晶内黑云母则位于两者之间。其  $\text{FeO}^{\text{T}}$ (全铁)的含量分别为 14.14%~14.48%、13.51%~14.09% 和 11.65%~12.55%;MgO 的含量依次是 15.31%~15.59%、14.78%~15.02% 和 16.17%~17.08%。从钾长石斑晶内到赋存于矿物颗粒间的黑云母 MgO 和  $\text{FeO}^{\text{T}}$  的变化,反映了在岩浆演化过程中,随着酸度的升高,岩浆含水量和氧逸度增加,岩浆向富铁贫镁的方向演化。在热液蚀变的过程中,Na、Fe 等元素析出,导致略褪色的黑云母中 MgO 含量增加。

表 1 沙坪沟钼矿区岩体斜长石电子探针成分分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclase from intrusions in the Shapinggou molybdenum ore district

岩性 样品编号	二长花岗岩 12gb65-3	花岗斑岩 12gb67-1-3	花岗斑岩 12gb67-1-2	花岗斑岩 13TP840-1	花岗斑岩 13TP840-3	正长岩 12gb73-1	正长岩 12gb73-2	正长岩 D6-5
Na <sub>2</sub> O	11.38	10.96	10.77	11.26	11.16	12.29	11.97	11.03
K <sub>2</sub> O	0.16	0.23	0.17	0.11	0.19	0.05	0.11	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.14	0.06	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
CaO	1.43	1.96	1.25	0.20	0.47	0.19	0.01	0.22
MnO	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.54	21.09	20.49	19.53	19.76	19.57	18.96	20.08
SiO <sub>2</sub>	66.74	66.47	66.98	68.30	68.30	67.48	67.90	69.11
FeO	0.00	0.11	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11
Total	100.25	100.95	99.80	99.56	99.24	99.60	98.95	100.68
Si	2.93	2.90	2.94	3.00	2.99	2.97	3.00	2.99
Al	1.06	1.09	1.06	1.01	1.02	1.02	0.99	1.02
Ca	0.07	0.09	0.06	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
Na	0.97	0.93	0.92	0.96	0.95	1.05	1.03	0.93
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
An	6.44	8.88	5.97	0.97	2.25	0.84	0.05	1.08
Ab	92.70	89.88	93.06	98.40	96.67	98.89	99.35	98.16
Or	0.86	1.24	0.97	0.63	1.08	0.26	0.60	0.76

表 2 沙坪沟钼矿区岩体条纹长石电子探针成分分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 2 Electron microprobe analyses of perthite from intrusions in the Shapinggou molybdenum ore district

岩性 样品编号	二长花岗岩		花岗斑岩			正长岩			
	12gb65-1	12gb67-1-4	12gb67-1-1	12gb67-2-2	12gb67-2-4	13TP842-1	13TP842-1-Pl	13TP842-2	13TP842-2-Pl
Na <sub>2</sub> O	0.93	1.38	0.98	0.29	0.22	0.43	11.12	2.13	11.50
K <sub>2</sub> O	16.38	15.84	15.75	16.43	17.22	16.44	0.40	14.17	0.19
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.09	0.11	0.05	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.07
MnO	0.00	0.01	0.08	0.11	0.07	0.09	0.04	0.01	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.75	18.04	18.24	18.05	18.01	18.50	19.54	18.05	19.57
SiO <sub>2</sub>	63.34	64.36	64.43	64.01	63.98	63.76	66.71	64.16	66.96
FeO	0.00	0.13	0.16	0.00	0.11	0.03	0.20	0.16	0.07
Total	98.40	99.75	99.69	98.89	99.61	99.34	98.35	98.72	98.36
Si	2.99	2.99	2.99	3.00	2.99	2.98	2.98	3.00	2.98
Al	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	1.02	1.03	0.99	1.03
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.09	0.12	0.09	0.03	0.02	0.04	0.96	0.19	0.99
K	0.99	0.94	0.93	0.98	1.03	0.98	0.02	0.84	0.01
An	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	0.33
Ab	7.94	11.69	8.64	2.61	1.90	3.82	96.61	18.60	98.60
Or	92.06	88.31	91.36	97.39	98.10	96.18	2.29	81.40	1.07

#### 4.4 石英

石英是沙坪沟钼矿岩体中常见浅色造岩矿物,呈他形粒状,有的晶内含大量气液包体,部分大颗粒

及自形粒状者呈斑晶产出,常被次生石英、钠长石、钾长石、白云母、绢云母交代呈残余。电子探针结果(表 4)显示,石英的成分简单,仅含微量 Al。

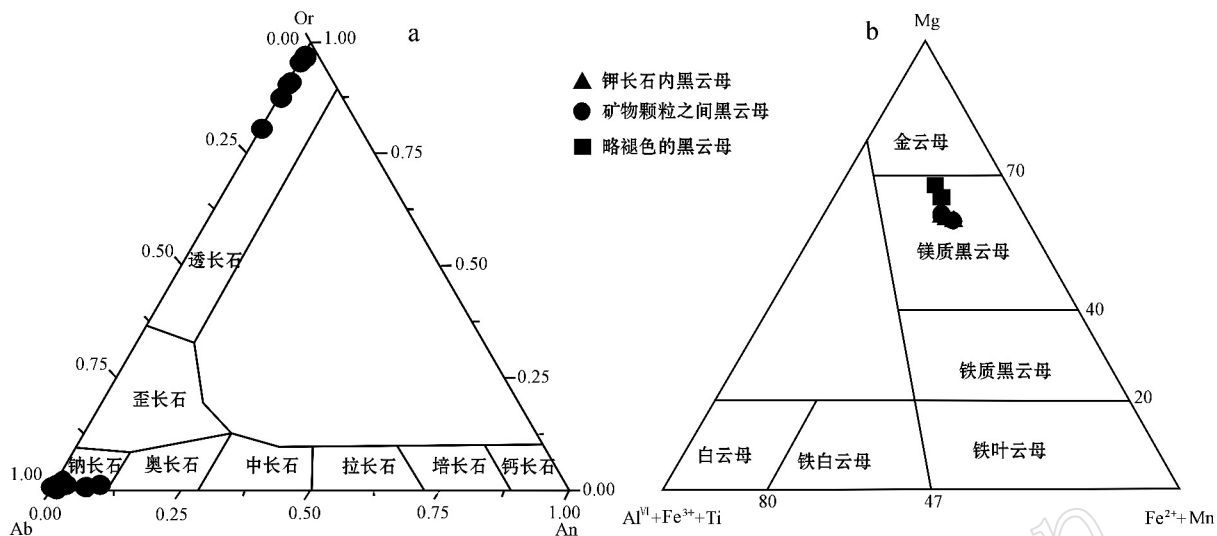


图 3 长石、云母成分分类图(a、b 分别据 Smith, 1974 及 Foster 等, 1960)

Fig. 3 Chemical composition classification diagrams for feldspar and biotite (after Smith, 1974 and Foster *et al.*, 1960 for Fig. 3a and Fig. 3b, respectively)

表 3 沙坪沟钼矿区岩体黑云母电子探针成分分析结果

$w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of biotite from intrusions in the Shapinggou molybdenum ore district

产状 样品编号	赋存于钾长石内的黑云母			赋存于颗粒之间的黑云母			略褪色的黑云母	
	13TP843-3	13TP843-4	13TP839-4	13TP839-3	13TP839-4	13TP839-5	13TP84-3	13TP839-2
TiO <sub>2</sub>	1.73	1.98	2.41	2.33	2.57	2.54	1.61	2.01
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.16	0.07	0.21	0.15	0.20	0.01	0.09
K <sub>2</sub> O	10.47	10.50	10.22	10.09	10.21	10.05	10.45	10.32
MnO	0.48	0.52	0.61	0.59	0.63	0.57	0.43	0.48
MgO	14.78	14.79	15.02	15.59	15.31	15.36	17.08	16.17
SiO <sub>2</sub>	37.85	37.47	37.41	38.24	37.22	37.67	38.83	38.27
FeO	13.51	13.90	14.09	14.15	14.14	14.48	11.65	12.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.73	12.93	11.70	11.65	11.57	11.90	12.02	11.85
CaO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01
F	2.43	2.65	1.82	2.45	2.38	1.69	2.12	1.82
Cl	0.00	0.10	0.10	0.07	0.07	0.10	0.00	0.02
Total	94.13	95.00	93.46	95.37	94.24	94.57	94.20	93.57
Si	2.87	2.82	2.87	2.87	2.84	2.86	2.91	2.90
Al <sup>IV</sup>	1.13	1.15	1.06	1.03	1.04	1.06	1.06	1.06
Al <sup>VI</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.10	0.11	0.14	0.13	0.15	0.15	0.09	0.11
Fe <sup>3+</sup>	0.31	0.32	0.26	0.31	0.29	0.24	0.28	0.26
Fe <sup>2+</sup>	0.55	0.56	0.64	0.58	0.62	0.68	0.45	0.54
Mn	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
Mg	1.67	1.66	1.72	1.74	1.74	1.74	1.91	1.83
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01
K	1.01	1.01	1.00	0.97	0.99	0.97	1.00	1.00
Total	7.69	7.68	7.74	7.69	7.71	7.76	7.72	7.74
MF	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.72	0.69
Al <sup>VI</sup> + Fe <sup>3+</sup> + Ti	0.41	0.43	0.4	0.44	0.43	0.39	0.37	0.37
Fe <sup>2+</sup> + Mn	0.58	0.59	0.68	0.61	0.66	0.71	0.48	0.57
Ti/(Mg + Fe + Ti + Mn)	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04
Al/(Al + Mg + Fe + Ti + Mn + Si)	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16

表 4 沙坪沟钼矿区岩体石英电子探针成分分析结果

$w_B/\%$

Table 4 Electron microprobe analyses of quartz from intrusions in the Shapinggou molybdenum ore district

样品编号	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Total
10gb68-1-4	—	—	0.01	—	—	99.82	99.83
10gb72-2-8	—	—	0.01	—	—	99.97	99.98

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因类型

本区黑云母的电子探针分析结果显示  $Fe^{2+} +$

$Fe^{3+}$  与  $Mg^{2+}$  的负相关性好(图 4a),且全部在  $Fe^{2+} + Fe^{3+} < 1.3$ 、 $Mg > 1.0$  的范围内,显示了 I 型花岗岩型(即同熔型花岗岩)特征(张东阳等, 2009)。徐克勤等(1984)曾提出用黑云母的 MF 来区分同熔型花岗岩和改造型花岗岩,  $MF < 0.38$  为改造型花岗

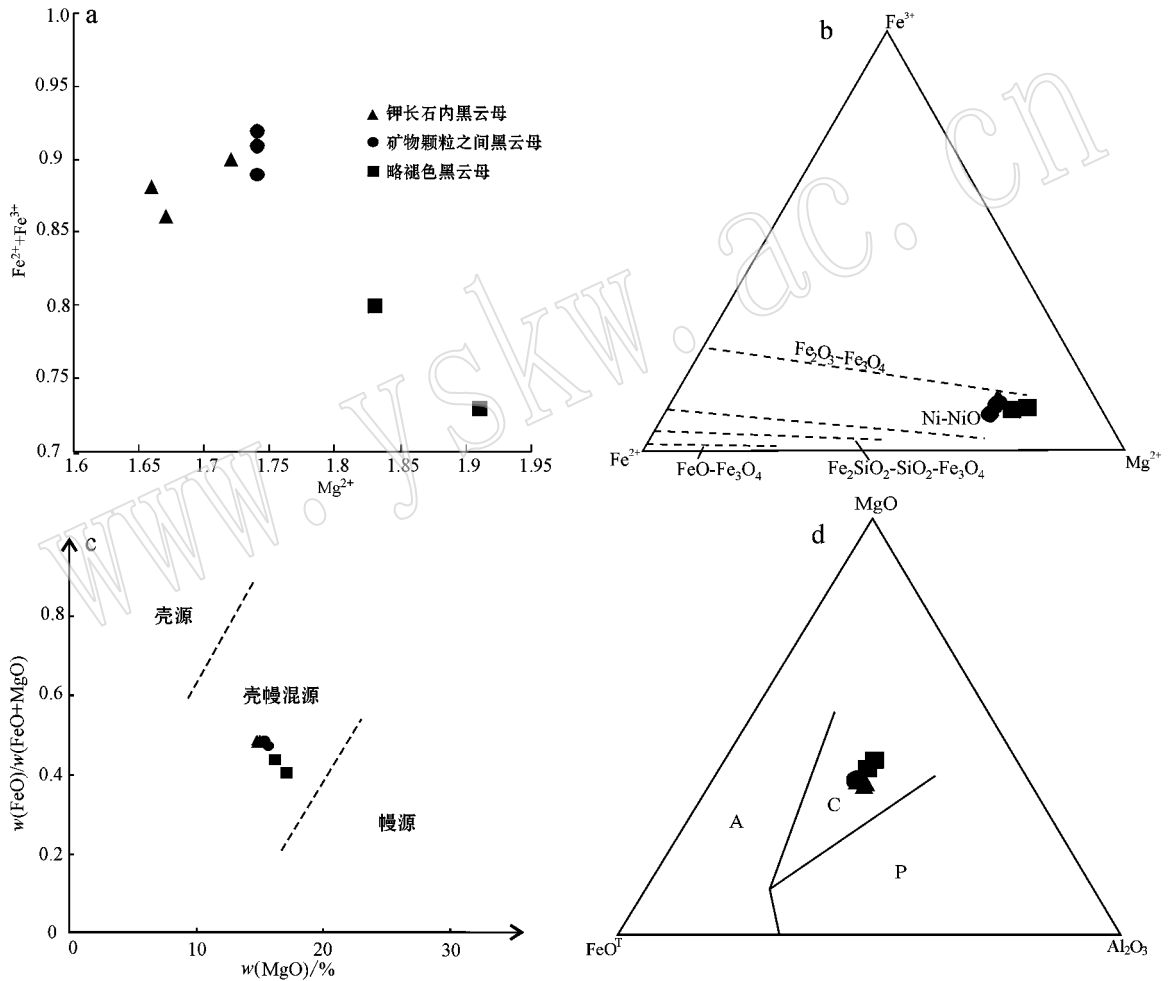


图 4 岩石成因类型图解

Fig. 4 Petrogenetic classification diagram

a— $Fe^{2+} + Fe^{3+}$  与  $Mg^{2+}$  相关性图解; b—黑云母  $Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+}$  图解(底图据 Wones and Eugster, 1965); c—黑云母  $FeO/(FeO + MgO) - MgO$  图解(底图据陈光远等, 1993); d—构造环境判别图(底图据 Abdel Rahman, 1994), 其中, A—非造山带碱性花岗岩中的黑云母所在区; P—过铝性花岗岩(包括 S 型)中黑云母所在区; C—造山带钙碱性花岗岩中黑云母所在区

a— $Fe^{2+} + Fe^{3+}$  and  $Mg^{2+}$  relativity diagram; b— $Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+}$  diagram of biotites (after Wones and Eugster, 1965); c— $FeO/(FeO + MgO) - MgO$  diagram of biotite (after Chen Guangyuan *et al.*, 1993); d—discrimination diagram of tectonic setting (after Abdel Rahman, 1994), A—area of biotite in non-orogenic alkali granite; P—area of biotite in peraluminous granite (including S-type); C—area of biotite in orogenic calc-alkaline granite



岩,反之则为同熔型花岗岩,其中  $MF = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn)$ 。本区黑云母 MF 值范围为 0.65~0.72,同样表明属于同熔型花岗岩。前人研究(Wones and Eugster, 1965; Albuquerque, 1973; Barrière and Cotton, 1979; Noyes, 1983)认为与磁铁矿、钾长石共生的黑云母中  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  的原子百分数可以估算黑云母结晶时的氧逸度。镜下观察表明本区黑云母与钾长石-磁铁矿共生,符合该逸度计的使用。从岩体黑云母的  $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$  图解(图 4b)中可以看出,本区岩体中黑云母样品均落在  $Ni-NiO$  与  $Fe_2O_3-Fe_3O_4$  两条缓冲线之间,说明黑云母是在较高氧逸度条件下结晶形成的。I 型花岗岩中黑云母化学成分位于  $Fe_2SiO_2-SiO_2-Fe_3O_4$  氧缓冲剂反应线之上(Wones, 1989),同样说明岩体属于 I 型花岗岩。

## 5.2 岩石成因

前人对东秦岭成矿带内钼矿床的成岩成矿物质来源进行了详细的研究,观点不一。有的学者依据岩石学方面的资料及岩体的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值为 0.7034~0.7080,接近或略高于上地幔的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值(0.702~0.706),认为东秦岭地区钼矿床成岩成矿物质是下地壳与上地幔的同熔产物(罗铭玖等, 1991; 张正伟等, 2001a, 2001b)。有的学者则根据岩体的锶、氧同位素特征,认为成岩成矿物质来源于下地壳(陈衍景等, 2000; 李永峰等, 2005)。

黑云母中 MgO 含量可以反映岩石物质来源及成岩成矿作用的一些地球化学特征,因此它的成分特点可以反映寄主岩石的成因类型和形成环境。据丁孝石(1988)研究,认为典型的幔源黑云母 MgO > 15%,而壳源黑云母中 MgO 小于 6%。本区所测样品中未受后期热液蚀变的黑云母 MgO 的含量变化于 14.78%~15.36%,具壳幔过渡的性质。在黑云母  $FeO/(FeO+MgO)-MgO$  图解(图 4c)中,所有黑云母均投影于壳幔源区,同样反映了本区的成岩物质主要为壳幔混源(陈光远等, 1993; 庞阿娟, 2012)。综合前人的研究认为,本区成岩物质是以下地壳为主,混有少量地幔组分。

Abdel Rahmar(1994)认为非造山碱性花岗岩系产于高温、无水的环境,不利于早期磁铁矿及钛铁氧化物结晶,故晚期结晶形成的黑云母具有富铁的特征,而造山带的钙碱性岩系则与俯冲有关,俯冲过程中产生富水流体有利于磁铁矿的早期结晶,致使晚

期结晶的黑云母具有富 Mg、相对富 Al 和贫 Ti 的特征,据此可以利用黑云母  $Fe^T-MgO-Al_2O_3$  组成有效区分花岗岩的类型。本区黑云母投影到  $FeO^T-MgO-Al_2O_3$  判别图中,均落入 C 区(图 4d),即造山带钙碱性岩石。前人研究显示本区岩体的形成时期为 120~130 Ma,该岩体位于华北陆块与扬子陆块之间,印支期相向俯冲挤压碰撞造山,早白垩世大别造山带区域应力场逐渐由挤压阶段向伸展阶段转化,地壳减薄,造山带边缘断裂走滑,其北缘的信阳-商城-霍山一带发育有中生代陆相火山岩及断裂边缘的一系列断陷盆地;区域性的岩石圈拆沉作用和地幔物质的上侵导致大别地区双倍陆壳的重熔,俯冲大陆板片的断离引起加厚下地壳大别片麻杂岩的熔融,进而形成了该区富钼岩浆岩(徐晓春, 2009)。

不同的岩浆只能结晶分异生成特定成分的云母,故黑云母化学成分的变化是岩浆物理化学条件变化的综合体现,对母岩的物理化学条件具指示意义(干国梁等, 1990; 王晓霞等, 1998; 李鸿莉等, 2007; 张东阳等, 2009; 赵希林等, 2010)。因略褪色黑云母受后期弱蚀变,故在黑云母的  $Ti-Mg/(Mg+Fe)$  温度估算图解中剔除该类黑云母,本区岩体中黑云母的结晶温度变化在 500~580℃(图 5a)。在黑云母  $lgf_{O_2}-t-Fe^{3+} \times 100/\Sigma Fe$  图解,本区岩体中黑云母  $lgf_{O_2}$  变化范围 -14~-14.5(图 5b)。

## 5.3 指示找矿意义

由于黑云母具有特殊的层状结构,故其可作为很多成矿元素的载体和富集矿物,其化学成分的变化能够灵敏地指示不同矿化类型及其与成矿的关系,并且可作为某些矿床的找矿标志(吕志成等, 2003)。周作侠(1988)研究了各种岩体镁铁云母类的含铁指数的变化与矿化特征的联系,认为低含铁指数( $f=0.05\sim 0.15$ )的金云母常伴生于含金刚石的金伯利岩中,而碳酸盐中金云母含铁指数明显上升,达到中等程度( $f=0.25$ ),不含矿。中含铁指数( $f=0.22\sim 0.42$ )的镁铁云母赋存在铜、钼、金矿化的岩体中。较高含铁指数( $f=0.28\sim 0.52$ )的镁铁云母主要与铁矿化有联系。含高铁指数( $f=0.52\sim 0.92$ )的镁铁云母斑岩体主要与钨矿化有关,少量斑岩体为钼矿化岩体。

本区黑云母  $f=0.25\sim 0.29$ ,为中含铁指数,与钼矿化岩体密切相关。表明黑云母的含铁指数的高低可以作为指示寻找钼矿的标志之一。

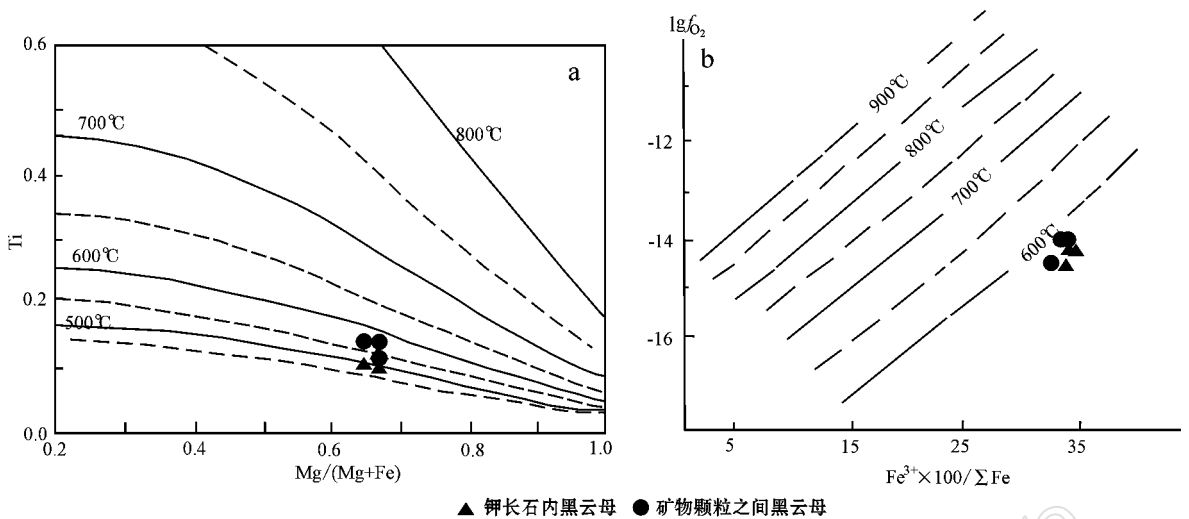


图 5 黑云母温度、氧逸度图解

Fig. 5 Geothermometric and oxygen fugacity diagram of biotite

a—黑云母  $Ti - Mg/(Mg + Fe)$  温度图解 (底图据 Henry 等, 2005); b—黑云母  $lg f_{O_2} - t - Fe^{3+} \times 100/\Sigma Fe$  图解 (底图据干国梁等, 1990)

a— $Ti - Mg/(Mg + Fe)$  geothermometric diagram of biotite (after Herry *et al.*, 2005); b— $lg f_{O_2} - t - Fe^{3+} \times 100/\Sigma Fe$  diagram of biotite (after Gan Guoliang *et al.*, 1990)

## 6 结论

(1) 沙坪沟钼矿斑岩体与钼矿化关系密切者以花岗斑岩为主, 其次为二长花岗(斑)岩、正长(斑)岩, 在矿物成分上以石英、钾长石、斜长石为主, 暗色矿物以黑云母为主, 其中斜长石主要为钠长石, 钾长石主要为条纹长石, 黑云母属于富镁黑云母。

(2) 黑云母存在三种产状, 即赋存于钾长石内黑云母、矿物颗粒之间黑云母及略褪色的黑云母, 后者相对前两者更靠近金云母端员, 应是后期受到热液蚀变, 导致 Na、Fe 含量降低而 MgO 含量相对升高。黑云母  $f = 0.25 \sim 0.29$ , 为中含铁指数。

(3) 本区岩石类型属于造山带钙碱性花岗岩, 形成温度为  $500 \sim 580^\circ C$ , 氧逸度  $10^{-14} \sim 10^{-15.8}$ , 成岩物质为壳幔混源, 岩体为幔源岩浆同熔壳源物质形成。

## References

Abdel-Rahman A M. 1994. Nature of biotites from alkaline cal-calcaine and peraluminous magmas [ J ]. *Journal of Petrology*, 35( 2 ): 525 ~ 541.

Afshooni S Z, Mirnejad H, Esmaily D, *et al.* 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.

Albuquerque A C. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal [ J ]. *Geochim Cosmochim Acta*, 37 : 1 779 ~ 1 802.

Barrière M and Cotton J. 1979. Biotites and associated minerals as markers of magmatic fractionation and deuteric equilibration in granites [ J ]. *Contr. Mineral Petrology*, 70 : 183 ~ 192.

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Xunruo, *et al.* 1993. *Genetic Mineralogy and Gold Mineralogy of Guojialing Granodiorites from Eastern Shandong, China* [ M ]. Beijing : China University of Geoscience Press, 1 ~ 131 (in Chinese).

Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [ J ]. *Geol. Surv. Prof. Paper*, 354B : 11 ~ 49.

Gan Guoliang and Chen Guangxiang. 1990. Composition characteristics of biotite in Dupangling granite and its implicatior [ J ]. *Hunan Geology*, 9( 3 ): 46 ~ 56 (in Chinese).

Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelites biotites : Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [ J ]. *Am. Mineral.*, 90 : 316 ~ 328.

Huang Fan, Wang Denghong, Lu Sanming, *et al.* 2011. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region [ J ]. *Mineral Deposits*, 30( 6 ): 1 039 ~ 1 057 (in Chinese).

- Jiang Guohao, Hu Ruizhong, Xie Guiqing, *et al.* 2005. Compositional Characteristics and petrological significance of the biotite in the Dajishan Granite, Jiangxi Province [ J ]. *J. Mineral Petrol.*, 25( 5 ): 58 ~ 61( in Chinese ).
- Li Hongli, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, *et al.* 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 ): 2 605 ~ 2 614( in Chinese ).
- Li Hongli, Bi Xianwu, Tu Guangchi, *et al.* 2007. Mineral chemistry of biotite from Yanbei pluton: implication for Sn-Metallogeny [ J ]. *J. Mineral Petrol.*, 27( 3 ): 49 ~ 54( in Chinese ).
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Hu Huabin, *et al.* 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area [ J ]. *Mineral Deposits*, 24( 3 ): 292 ~ 304.
- Liu Bin, Ma Changqian, Liu Yuanyuan, *et al.* 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 ).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Dong Guanghua, *et al.* 2003. Mineral chemistry of biotite from granites related to different mineralization and occurred in two stages of Yeshanina period in South-Middle part of the Daxing'an mountains and its petro genetic and metallogenic significance [ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23( 2 ): 177 ~ 183( in Chinese ).
- Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Quanying, *et al.* 1991. Molybdenum Deposit in China [ M ]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1 ~ 452( in Chinese ).
- Meng Xiangjin, Xu Wenyi, Lu Qintian, *et al.* 2012. Zircon U-Pb Dating of Ore-Bearing Rocks and Molybdenite Re-Os Age in Shapinggou Porphyry Molybdenum deposit, Anhui Province [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 48( 3 ): 486 ~ 493( in Chinese ).
- Noyes H J, Wones D R and Frey F A. 1983. A tale of two plutons: petrographic and mineralogic constraints on the petro-genesis of the Red Lake and Eagle Peak plutons, Central Sierra Nevada, California [ J ]. *The Journal of Geology*, 91( 4 ): 353 ~ 378.
- Pang Ajuan, Li Shengrong, Zhang Huafeng, *et al.* 2012. Genetic mineralogy significance of major minerals of Jilongshan pluton, Hubei province [ J ]. *J. Mineral Petrol.*, 32( 3 ): 25 ~ 33( in Chinese ).
- Smith J V. 1974. Feldspar Mineral [ M ]. New York: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 1 ~ 200.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of archaean felsic plutonic rocks, Berens river area, northwest superior province, Ontario, Canada [ J ]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455 ~ 470.
- Wang Xiaoxia and Lu Xinxiang. 1998. A Study of biotite from the Shewan Rapakivi granite in Qinling and its significance [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17( 4 ): 352 ~ 358( in Chinese ).
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application [ J ]. *Am. Mineral.*, 50: 1 228 ~ 1 235.
- Wones D R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks [ J ]. *Am. Mineral.*, 74: 744 ~ 749.
- Xu Xiaochun, Lou Jinwei, Lu Sanming, *et al.* 2009. Re-Os age of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province [ J ]. *Mineral Deposits*, 28( 5 ): 621 ~ 632( in Chinese ).
- Yu Wen, Ni Pei, Wang Guoguang, *et al.* 2012. Evolution of ore-forming fluids of the Shapinggou Porphyry molybdenum deposit, Jinzhai, Anhui Province [ J ]. *Journal of Nanjing University( Natural Sciences )*, 48( 3 ): 240 ~ 255( in Chinese ).
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. Mineralogy of ore-bearing porphyries in Lailisigao'er area of the West Tianshan Mountain and its implications for petrogenesis and mineralization [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28( 1 ): 3 ~ 16( in Chinese ).
- Zhang Hong, Sun Weidong, Yang Xiaoyong, *et al.* 2011. Geochronology and Metallogenesis of the Shapinggou Giant Porphyry Molybdenum Deposit in the Dabie Orogenic Belt [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 85( 12 ): 2 039 ~ 2 059( in Chinese ).
- Zhang Huaidong, Shi Dongfang, Hao Yuejin, *et al.* 2010. Geological features of the shapinggou porphyry molybdenum ore deposit, Jinzhai county, Anhui Province [ J ]. *Geology of Anhui*, 20( 2 ): 104 ~ 108( in Chinese ).
- Zhang Huaidong, Wang Bohua, Hao Yuejin, *et al.* 2012. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapinggou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province [ J ]. *Mineral Deposits*, 31( 1 ): 41 ~ 51( in Chinese ).
- Zhang Huaidong, Wang Genjie and Shi Dongfang. 2010. Metallogenic conditions of the Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Jinzhai county, Anhui Province and the prospecting direction [ J ]. *Shanghai Geology*, 31: 203 ~ 205( in Chinese ).
- Zhang Zhengwei and Deng Jun. 2001a. Geological setting of the eastern Qinling molybdenum ore belt and features of the Mo-associated intrusior [ A ]. Chen Yanjing, Zhang Jing and Lai Yong. *Continental Geodynamics and Metallogenesis* [ C ]. Beijing: Seismological Press, 100 ~ 109( in Chinese ).
- Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, *et al.* 2001. Petrogenetic metallogenetic background and time space relationship of the East Qinling molybdenum ore belt, China [ J ]. *Geological Journal of China University*, 7( 3 ): 307 ~ 315( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Xilin and Mao Jianren. 2010. Characteristics of biotites and their petrogenesis implication of late Yanshanian granites in southwestern Fujian province [ J ]. *Resources Survey and Environment*, 31( 1 ): 12 ~ 18( in Chinese ).

Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning[J]. Acta Petrologica Sinica, 3: 63~73 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 107~140.
- 陈衍景, 李超, 张静, 等. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊): 64~72.
- 干国梁, 陈志雄. 1990. 都庞岭花岗岩中黑云母成分特征及其意义[J]. 湖南地质, 9(3): 46~56.
- 黄凡, 王登红, 陆三明, 等. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄——兼论东秦岭-大别山中生代钼成矿作用期次划分[J]. 矿床地质, 30(6): 1039~1057.
- 蒋国豪, 胡瑞忠, 谢桂青, 等. 2005. 大别山花岗岩体黑云母地球化学特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 25(5): 58~61.
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 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, 涂光炽, 等. 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.
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(3): 292~304.
- 刘彬, 马昌前, 刘园园, 等. 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.
- 吕志成, 段国正, 董广华, 等. 2003. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 23(2): 177~183.
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州: 河南科技出版社, 1~452.
- 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 等. 2012. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb

- 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 86(3): 486~493.
- 庞阿娟, 李胜荣, 张华峰, 等. 2012. 湖北鸡笼山岩体主要矿物的成因矿物学意义[J]. 矿物岩石, 32(3): 25~33.
- 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.
- 徐克勤, 孙霖, 王德滋, 等. 1984. 华南花岗岩与成矿[A]. 徐克勤, 涂光炽. 花岗岩地质和成矿关系(国际学术会议论文集)[C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1~20.
- 徐晓春, 楼金伟, 陆三明, 等. 2009. 安徽金寨银钼矿床 Re-Os 和有关岩浆岩  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定[J]. 矿床地质, 28(5): 621~632.
- 于文, 倪培, 王国光, 等. 2012. 安徽金寨县沙坪沟斑岩钼矿床成矿流体演化特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 48(3): 240~255.
- 张东阳, 张招崇, 艾羽, 等. 2009. 西天山莱历斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩体矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(1): 3~16.
- 张红, 孙卫东, 杨晓勇, 等. 2011. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究[J]. 地质学报, 85(12): 2039~2059.
- 张怀东, 史东方, 郝跃进, 等. 2010a. 安徽省金寨县沙坪沟斑岩型钼矿成矿地质特征[J]. 安徽地质, 20(2): 104~108.
- 张怀东, 王波华, 郝跃进, 等. 2012. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 31(1): 41~51.
- 张怀东, 王根节, 史东方. 2010b. 安徽省金寨县沙坪沟斑岩型钼矿床成矿条件及找矿方向初探[J]. 上海地质, 31: 203~205.
- P 张正伟, 邓军. 2001a. 东秦岭钼矿带成矿背景与含矿岩体特征[A]. 陈衍景, 张静, 赖勇. 大陆动力学与成矿作用[C]. 北京: 地震出版社, 100~109.
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 2001b. 东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性[J]. 高校地质学报, 7(3): 307~315.
- 赵希林, 毛建仁. 2010. 闽西南地区燕山晚期花岗岩黑云母特征及成因意义[J]. 资源调查与环境, 31(1): 12~18.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 3: 63~73.