

doi: 10.13745/j.esf.2015.02.006

# 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

陶继华<sup>1,2,3</sup>, 岑涛<sup>3,4</sup>, 龙文国<sup>5</sup>, 李武显<sup>3</sup>

1. 东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013
2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013
3. 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
4. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049
5. 国土资源部武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430223

TAO Jihua<sup>1,2,3</sup>, CEN Tao<sup>3,4</sup>, LONG Wenguo<sup>5</sup>, LI Wuxian<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China
2. College of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China
3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan 430223, China

TAO Jihua, CEN Tao, LONG Wenguo, et al. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(2): 064-078

**Abstract:** Indosinian magmatic activities are widely developed in South China and a great amount of granitoids were produced. The granitic rocks can be divided into two types by mineral assemblages. One category is strongly peraluminous granites (SPG) containing typical peraluminous minerals such as muscovite, tourmaline and topaz. The other category is weakly peraluminous granites (WPG) bearing hornblende and other mafic minerals such as biotite, and lacking typical peraluminous minerals. Biotite is an important ferromagnesian mineral in the granitoids, and its composition can be used as a powerful tool in evaluating the physical-chemical conditions and identifying the magmatic source natures. In this paper, the biotites from the two types of granitic rocks from the Indosinian Longyuanba complex in southern Jiangxi Province and Baimashan complex in central Hunan Province were chosen to study. The results suggest that the biotites in the WPG, which are rich in Mg, and poor in Al and Fe, belong to Mg-biotites, whereas the biotites in SPG, which are poor in Mg, and rich in Al and Fe, belong to Fe-biotites. The temperature and fugacity of oxygen were also calculated using compositions of biotites, and the results show that the WPG have higher magma temperature and oxygen fugacity than the SPG. On the basis of the composition of biotites, the WPG are the result of the mixing of crust- and mantle-derived magmas, while the SPG are likely to be derived from the partial melts of nearly pure sedimentary materials in crust. Therefore, the compositions of biotite in granitic rocks can be employed in tracing the nature of the magma source, but can not be alone used to discriminate tectonic environment.

**Key words:** biotite; Longyuanba; Baimashan; Indosinian; granite

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-06-10

基金项目: 中国地质调查局基础地质综合研究项目(1212011085416); 国家自然科学基金项目(41173039, 41303020); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2012208)

作者简介: 陶继华(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩浆岩岩石学、岩石地球化学的教学与研究工作。E-mail: taojihua123@163.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)

**摘要:**华南印支期岩浆活动强烈,并形成了大量的花岗质岩石,按矿物组合可将其分为含典型过铝质矿物白云母、电气石、黄玉的强过铝质花岗岩(SPG)和含角闪石、黑云母等镁铁质矿物,而缺乏典型过铝质矿物的弱过铝质花岗岩(WPG)两大类。黑云母是花岗岩类岩石中最常见的镁铁质矿物之一,其成分特征可以有效示踪花岗岩的成岩物理—化学条件和源区性质。以赣南印支期龙源坝岩体和湘中白马山岩体为例,对华南印支期花岗岩中两类过铝质岩石的黑云母矿物化学成分进行研究,结果显示 WPG 中黑云母富镁、贫铝、贫铁,属镁质黑云母,而 SPG 中黑云母贫镁、富铝、富铁,属铁质黑云母。黑云母平衡结晶温度和氧逸度估算结果显示,WPG 比 SPG 具有更高的岩浆温度和氧逸度。WPG 属于壳幔岩浆混合产物,而 SPG 则来自于接近地壳沉积物部分熔融产物。花岗岩中黑云母的化学成分可以有效判断源区性质,无法单独判断构造背景。

**关键词:**黑云母;龙源坝;白马山;印支期;花岗岩

**中图分类号:**P588.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2015)02-0064-15

岩浆岩中镁铁质硅酸盐矿物的结构、构造及其化学成分特征可以反映寄主岩浆的物理—化学条件<sup>[1-2]</sup>。黑云母是花岗岩类岩石中最常见的镁铁质矿物之一,它可以形成于准铝质到强过铝质的各类花岗质岩石中。黑云母的结晶化学式为  $A_2M_6T_8O_{20}(OH)_4$ ,其中  $T=Si, Al$ ;  $M=Mg, Fe, Mn, Cr, Ti, Zn, V$ ;  $A=K, Na, Ba$ ;  $OH=F, Cl, OH$ 。大量研究表明黑云母的化学成分可以有效地示踪岩浆的分异演化程度及其成岩物理—化学条件<sup>[3-11]</sup>,同时还对判别岩浆源区,岩石形成构造背景,后期构造—热液事件以及花岗岩的成矿潜力都具有重要的指示意义<sup>[2,9,11-21]</sup>。

华南内陆发育宽广的早中生代(印支期)褶皱造山带,并伴随强烈的花岗质岩浆活动,形成了大量的花岗质岩石。按矿物组合特征可将其分为两大类<sup>[22-24]</sup>:(1)强过铝质花岗岩(SPG)。岩石以强过铝质特征为主( $ACNK>1.1$ ),含典型的过铝质矿物白云母、电气石和黄玉等<sup>[22-24]</sup>,如阳明山二云母花岗岩和含电气石白云母花岗岩<sup>[25]</sup>、贵东岩体下庄二云母花岗岩<sup>[26-27]</sup>、红山含黄玉花岗岩<sup>[28]</sup>等。(2)弱过铝质花岗岩(WPG)。岩石以弱过铝质特征为主( $ACNK=1.0\sim 1.1$ ),暗色矿物以黑云母为主,有时含角闪石,但缺乏典型过铝质矿物<sup>[22-24,29]</sup>,如贵东岩体鲁溪含角闪石黑云母花岗岩<sup>[26]</sup>,白马山岩体含角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩<sup>[30]</sup>,龙源坝黑云母花岗岩<sup>[31]</sup>等。尽管目前有许多文献详细研究了这些过铝质花岗岩体的年代学和地球化学,并探讨了它们形成的构造背景<sup>[22-23,30,32]</sup>,但是对这些花岗岩中上述主要岩石类型的成因研究较少,本文试图通过对其中代表性岩体,即赣南龙源坝岩体和湘中白马山岩体及其中的暗色包体和上述两类花岗岩中黑云母的矿物化学特征进行系统研究,探讨两类花岗岩形成的物理—化学条件和岩浆源区特征,在此基础上讨论黑云母化学成分对判断岩石成因及其形成构造

环境的意义。

## 1 岩体地质概况

赣南龙源坝岩体和湘中白马山岩体是华南印支期花岗岩体的典型代表,两个岩体均出露有强过铝质花岗岩(SPG)和弱过铝质花岗岩(WPG),岩石中均普遍发育有新鲜的黑云母<sup>[23,30-31,33-36]</sup>。

龙源坝岩体出露于赣南地区全南县龙源坝一带,出露面积近 500 km<sup>2</sup>,为印支期到燕山期多期次岩浆活动的复式岩体(图 1)。岩体与围岩呈侵入接触关系,在东部侵入前寒武纪变质岩;南侧与西侧主要侵入于寒武系—侏罗系,岩体北部被白垩系—第四系覆盖。岩体内部断裂构造发育,其中岩体北部发育一系列 NE 向断裂构造,南部断裂构造发育较少。

龙源坝岩体主体为印支期花岗岩<sup>[37]</sup>,形成年龄为 210~240 Ma<sup>[33-34]</sup>,主要由黑云母花岗岩和二云母花岗岩构成:(1)黑云母花岗岩呈粗粒似斑状结构,块状构造,偶见暗色包体,包体呈浑圆状,细粒结构,可见长石斑晶,主要造岩矿物有钾长石(含量 20%~40%)、斜长石(含量 30%~35%)、石英(含量 20%~30%)、黑云母(含量 5%~10%)和少量岩浆绿帘石(含量约 1%),副矿物主要有锆石、榍石、磷灰石、褐帘石、铁钛氧化物;(2)二云母花岗岩为中细粒似斑状结构,块状构造,斑晶主要为钾长石,主要造岩矿物有钾长石(含量 25%~40%)、斜长石(含量 20%~30%)、石英(含量 25%~30%)、黑云母(含量 5%~10%)、白云母(含量 3%~7%),副矿物主要有锆石、磷灰石、铁钛氧化物。

白马山岩体位于湘中地区的溆浦、隆回、新化县境内,出露面积约 1 600 km<sup>2</sup>,为一加里东期—印支期多期次岩浆活动的复式岩体(图 1)<sup>[30,36,38-39]</sup>。岩体呈北东东展布,侵入于新元古代—泥盆纪地层之

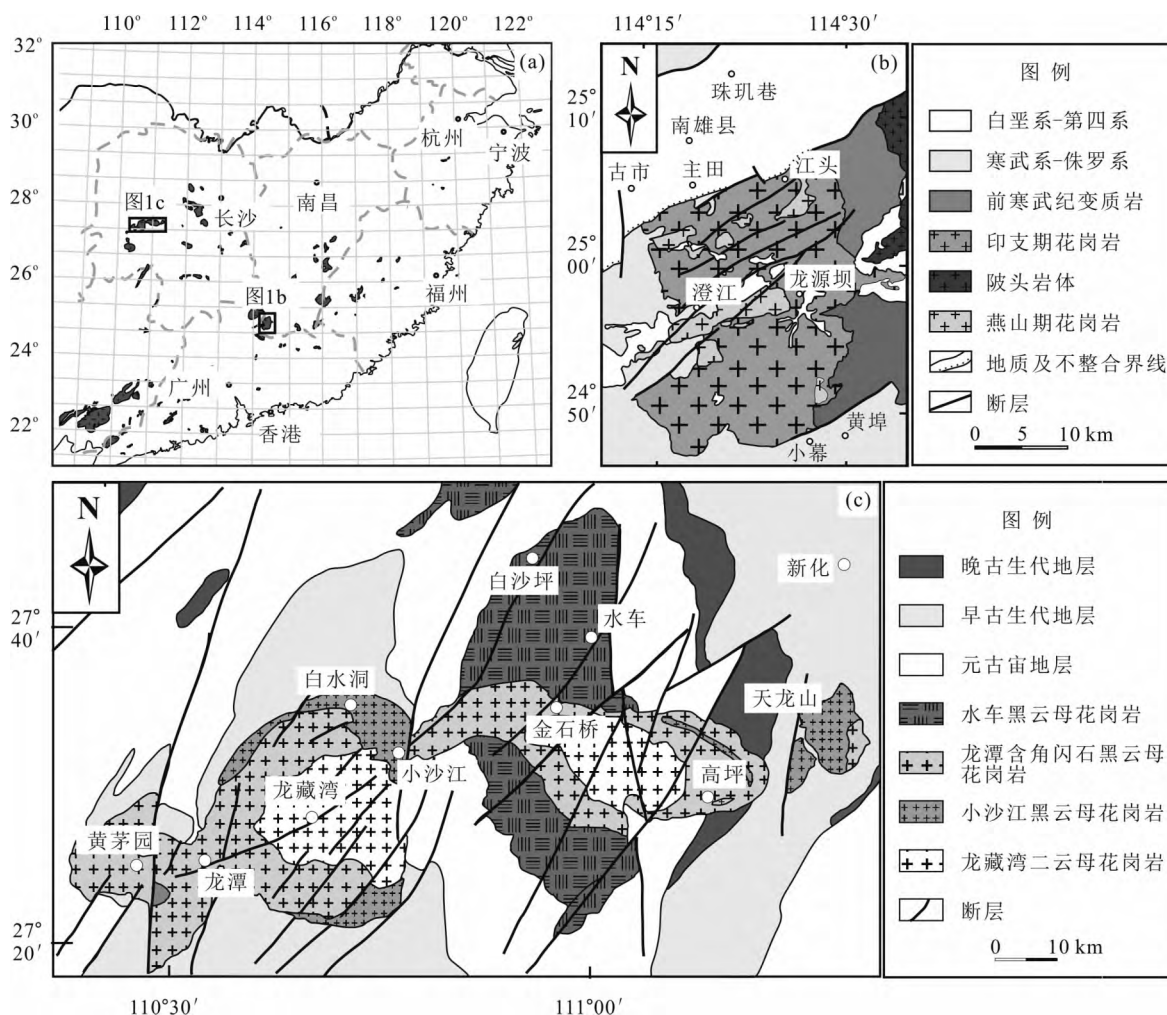


图1 中国东南部印支期花岗岩分布概图(a)、龙源坝复式岩体地质简图(b)<sup>①</sup>和白马山复式岩体地质简图(c)  
 (a 图据文献[42]修改, b 图据文献[31]和①修改, c 图据文献[30]修改)

Fig. 1 A sketch map showing distribution of the Indosinian granites in southeastern China(a), a simplified geological map of the Longyuanba complex(b), and a sketch geological map of Baimashan complex(c)

中<sup>[30,36]</sup>。岩体内部发育了一系列以北东向为主的断裂构造。白马山岩体印支期花岗岩主要由龙潭含角闪石黑云母花岗岩、小沙江黑云母花岗岩以及龙藏湾二云母花岗岩构成(图1)<sup>[23,30]</sup>。锆石 U-Pb 年代学分析结果显示,它们形成于 204~223 Ma<sup>[30,35-36,39-41]</sup>。野外考察和室内镜下观察发现:(1)龙潭含角闪石的黑云母花岗岩呈块状构造,中细粒—中粗粒结构,局部似斑状结构,斑晶以斜长石为主,斑晶直径 0.5~5 cm 左右,造岩矿物主要有钾长石(含量 10%~40%)、斜长石(含量 25%~50%)、石英(含量 20%~30%)、黑云母(含量 6%~10%)、角闪石(含量 1%~3%),斜长石常发育聚片双晶和卡钠复合双晶,可见清晰的环带构造,有的呈筛孔状结构。石英呈他形,见波状消光现象,黑云母多色性明显,常与角闪石共

生在一起。副矿物主要有锆石、磷灰石、榍石、铁钛氧化物。岩体局部可见较多的暗色包体,呈浑圆状,包体直径大约 2~30 cm 不等,包体与寄主岩界线清晰,暗色矿物含量较多,细粒结构,含钾长石斑晶。包体与寄主岩组成矿物相似,斜长石具明显的环带结构,含量占 35%~50%,石英含量约 15%。暗色矿物含量较高,以黑云母和角闪石为主,黑云母含量约占 20%~30%,角闪石含量约占 2%。(2)小沙江黑云母花岗岩为块状构造,粗粒结构。造岩矿物主要有钾长石(含量 30%~35%)、斜长石(含量 30%~35%)、石英(含量 25%~30%)和黑云母(含

① 江西省重工业局,广东省地质局. 区域地质矿产调查报告书(龙南幅,1:200 000). 1970.

量约 10%)。可见钾长石和斜长石呈巨晶状出现, 钾长石巨晶常包裹有斜长石和黑云母矿物颗粒, 斜长石巨晶常包裹黑云母矿物颗粒, 钾长石以格子状双晶为主, 常见斜长石清晰的环带状构造, 石英常呈他形充填于钾长石和斜长石矿物颗粒之间。副矿物主要有锆石、磷灰石、铁钛氧化物。(3) 龙藏湾二云母花岗岩呈块状构造, 中细粒结构。造岩矿物主要有钾长石(含量约 25%)、斜长石(含量约 35%)、石英(含量约 35%)、黑云母(含量约 5%)和白云母(含量约 5%)。钾长石呈他形, 见包裹有斜长石、石英、黑云母等矿物颗粒, 斜长石自形, 有的已发生微弱的绢云母化, 有的黑云母已经褪色为白云母, 白云母呈细鳞片状, 与黑云母呈交代状共生在一起。副矿物主要有锆石、磷灰石、铁钛氧化物。

## 2 样品及分析方法

本次研究的样品选自龙源坝岩体印支期黑云母花岗岩、二云母花岗岩, 白马山岩体龙潭含角闪石黑云母花岗岩和其中的暗色闪长质岩石包体、小沙江黑云母花岗岩以及龙藏湾二云母花岗岩的新鲜样品(图 2)。其中龙源坝印支期黑云母花岗岩(图 2a)中黑云母呈它形一半自形, 黄绿色—黄褐色, 多色性强, 常包裹有多种副矿物如锆石、磷灰石、钛铁矿、绿帘石等; 龙源坝印支期二云母花岗岩(图 2b)中黑云母呈它形, 很多已经发生了白云母化蚀变, 黄绿色—浅黄褐色, 多色性强, 见包裹有少量锆石、磷灰石、钛铁矿等副矿物。龙潭含角闪石的黑云母花岗岩中黑云母(图 2c)呈它形一半自形, 浅黄绿色—深黄褐色, 多色性强, 见包裹有石英、锆石、磷灰石、钛铁矿等矿物; 包体(图 2d)中的黑云母含量较高(20%~30%), 颗粒较细小, 呈半自形—自形, 浅黄绿色—深黄褐色; 小沙江黑云母花岗岩(图 2e)中黑云母呈它形一半自形, 浅黄绿色—深黄褐色, 多色性强, 矿物包裹体较多, 比如锆石、磷灰石、钛铁矿等; 龙藏湾二云母花岗岩(图 2f)中黑云母普遍发生了白云母化蚀变, 呈它形, 浅黄绿色—黄褐色, 多色性强, 见包裹有锆石、钛铁矿等副矿物。

将挑选的所有岩石样品磨制成探针片, 经显微镜下详细观察后, 挑选出代表性的样品进行电子探针化学成分分析。样品测试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, 所用仪器为 JEOL JXA8100 型电子探针

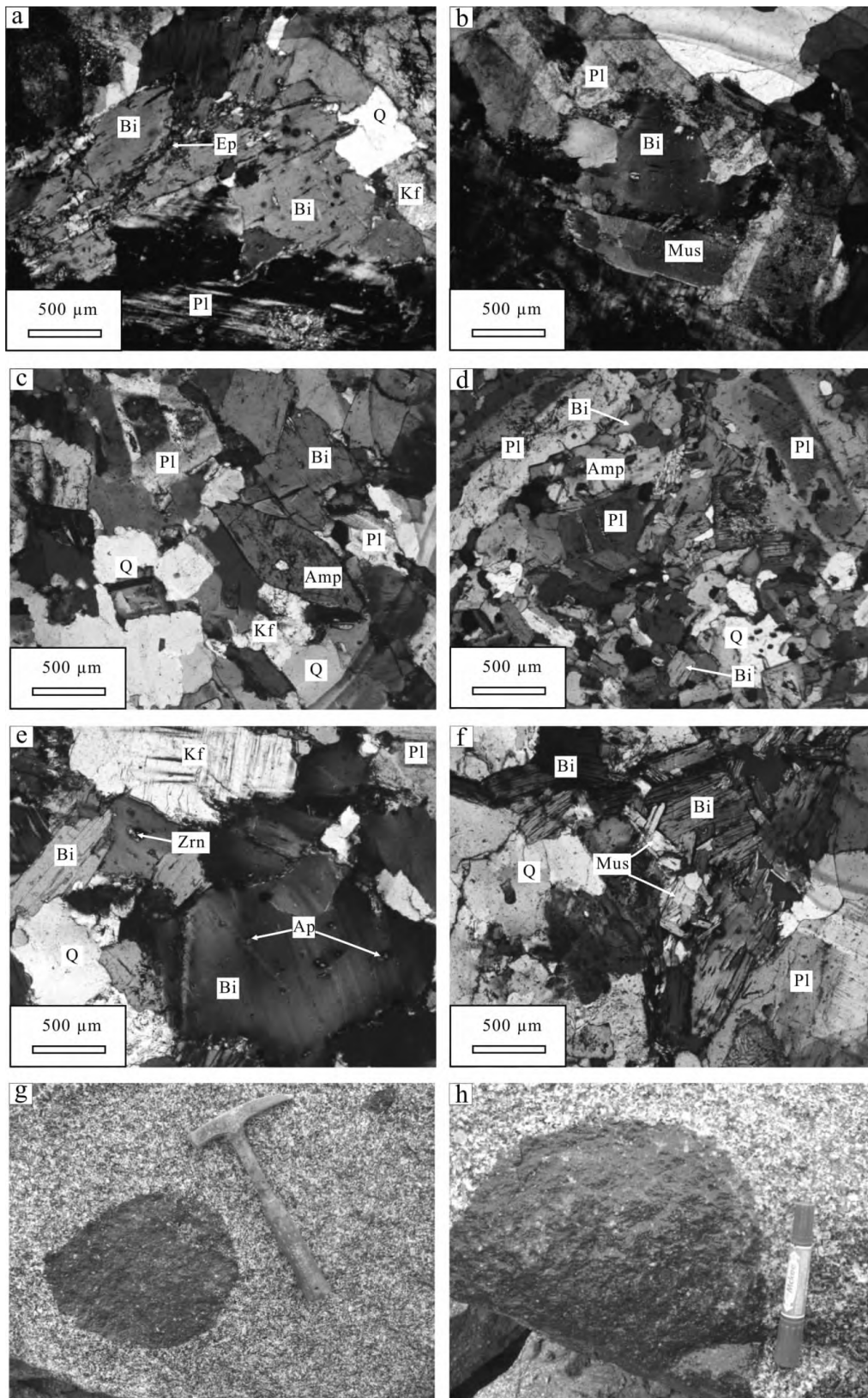
仪。测试条件: 加速电压 15 kV, 探针电流 20 nA, 计数时间为 20 s, 束斑直径 1  $\mu\text{m}$ ; 标样采用美国 SPI 公司的硅酸盐矿物及氧化物标样, 校正方法为 ZAF 修正法。

## 3 分析结果

所有样品的黑云母电子探针分析结果见附表 1, 表中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  的含量采用林文蔚和彭丽君<sup>[43]</sup>的计算方法获得, 并以 22 个 O 原子为单位计算黑云母的阳离子数及相关参数。从表中可以看出, 含角闪石黑云母花岗岩和黑云母花岗岩(WPG)中黑云母比二云母花岗岩(SPG)中黑云母富镁、贫铝(图 3a), 不同类型岩石中黑云母化学特征为: (1) 龙源坝黑云母花岗岩  $w(\text{MgO})=8.39\%\sim 9.86\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=15.39\%\sim 16.91\%$ , 二云母花岗岩  $w(\text{MgO})=7.10\%\sim 7.95\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=16.94\%\sim 17.84\%$ ; (2) 龙潭含角闪石黑云母花岗岩  $w(\text{MgO})=9.04\%\sim 11.46\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=14.63\%\sim 15.98\%$ , 小沙江黑云母花岗岩  $w(\text{MgO})=9.58\%\sim 10.88\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=14.48\%\sim 17.50\%$ , 暗色包体  $w(\text{MgO})=10.23\%\sim 11.17\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=14.13\%\sim 14.79\%$ , 龙藏湾二云母花岗岩  $w(\text{MgO})=5.89\%\sim 7.16\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=17.57\%\sim 19.07\%$ 。

而二云母花岗岩(SPG)中黑云母比含角闪石黑云母花岗岩和黑云母花岗岩(WPG)中黑云母更富铁(图 3b), 表现为: (1) 龙源坝黑云母花岗岩  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=20.96\%\sim 22.63\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.52\sim 0.57$ (Mg 为  $\text{Mg}^{2+}$  离子个数), 二云母花岗岩  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=21.67\%\sim 24.15\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.58\sim 0.64$ ; (2) 龙潭含角闪石黑云母花岗岩  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=19.38\%\sim 21.17\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.47\sim 0.54$ , 小沙江黑云母花岗岩  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=19.59\%\sim 20.23\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.47\sim 0.51$ , 暗色包体  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=19.51\%\sim 20.52\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.47\sim 0.49$ , 龙藏湾二云母花岗岩  $w(\text{FeO}^{\text{T}})=21.23\%\sim 23.54\%$ ,  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.61\sim 0.67$ 。

所有黑云母的  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$  比值变化都比较小(变化范围在 0.02~0.07), 表明其未遭受后期流体改造<sup>[44]</sup>。马昌前等<sup>[45]</sup>总结了国内外 120 个不同产状的黑云母化学成分特征后认为黑云母的 Ti 含量和  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值是判断火成和变质/

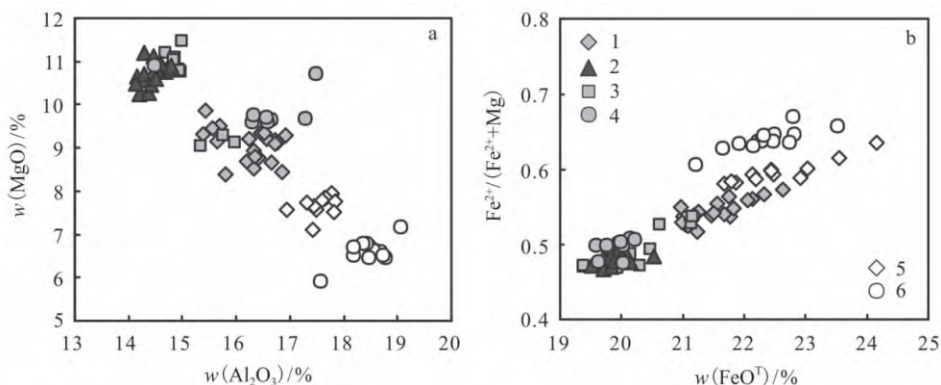


a—龙源坝印支期黑云母花岗岩；b—龙源坝印支期二云母花岗岩；c—白马山龙潭含角闪石黑云母花岗岩；d—白马山含角闪石黑云母花岗岩中暗色包体；e—白马山小沙江黑云母花岗岩；f—白马山龙藏湾二云母花岗岩；g、h—白马山含角闪石黑云母花岗岩中暗色包体；Bi—黑云母，Pl—斜长石，Kf—钾长石，Q—石英，Amp—角闪石，Mus—白云母，Ep—绿帘石，Ap—磷灰石，Zrn—锆石。

图 2 黑云母显微照片及暗色包体野外照片

Fig. 2 Microscope images of the biotites and field photos of mafic enclaves

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)



1—龙源坝印支期黑云母花岗岩; 2—暗色包体; 3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩; 4—小沙江黑云母花岗岩; 5—龙源坝印支期二云母花岗岩; 6—龙藏湾二云母花岗岩。

图3 黑云母 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解(a)和 Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup> + Mg)-FeO<sup>T</sup> 图解(b)

Fig. 3 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram (a) and Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup> + Mg)-FeO<sup>T</sup> diagram (b) for the biotite

交代成因的重要指标,退变质和交代成因黑云母 Ti < 0.2 apfu(atoms per formula unit);进变质成因黑云母 Ti 含量变化较大,且 Mg/(Mg + Fe)(Mg 为 Mg<sup>2+</sup> 离子个数,Fe = Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup> 离子个数之和)比值大多大于 0.55;而岩浆成因黑云母 Ti 含量介于 0.20~0.55 apfu,且 Mg/(Mg + Fe) = 0.30~0.55。除了小沙江黑云母花岗岩中一个分析点 Ti 小于 0.2 (11HN19-1-40, Ti = 0.142 apfu),所有研究的黑云母 Ti 含量变化于 0.20~0.44 apfu,而 Mg/(Mg + Fe) 比值介于 0.32~0.51(表 1),表明这些黑云母属于岩浆成因。在 Foster<sup>[46]</sup> 的黑云母分类图解中(图 4),龙潭含角闪石黑云母花岗岩、小沙江黑云母花岗岩以及暗色包体中的黑云母均落在镁质黑云母区域,龙源坝黑云母花岗岩中黑云母则落在镁质黑云母和铁质黑云母分界处;而龙源坝二云母花岗岩和龙藏湾二云母花岗岩中黑云母均属于铁质黑云母。

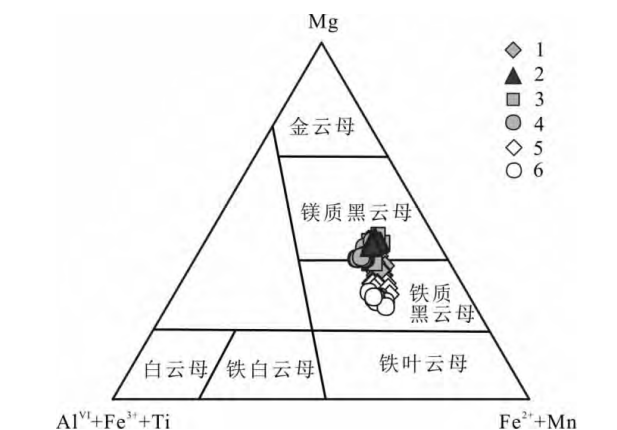
#### 4 黑云母形成的物理—化学条件及其对寄主花岗岩成因的制约

##### 4.1 岩浆温度

温度是控制花岗岩浆形成的重要因素之一<sup>[47]</sup>。实验研究表明,温度是黑云母中 Ti 含量的关键性控制因素<sup>[8,17,48-49]</sup>。Henry 等<sup>[8]</sup> 根据过铝质变泥质岩熔融产物中黑云母的 Ti 含量与温度的相关性,提出了一个经验的 Ti 饱和温度计算公式:

$$T = \{[\ln(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283(X_{\text{Mg}})]/b\}^{0.333}$$

式中 T 为温度(°C),Ti 为按 22 个 O 原子为单位计算阳离子数后的原子数, X<sub>Mg</sub> = Mg/(Mg +



1—龙源坝印支期黑云母花岗岩; 2—暗色包体; 3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩; 4—小沙江黑云母花岗岩; 5—龙源坝印支期二云母花岗岩; 6—龙藏湾二云母花岗岩。

图4 黑云母的分类图解

(底图据文献[45])

Fig. 4 The classification diagram of the biotite

Fe), b = 4.6482 × 10<sup>-9</sup>。其中 X<sub>Mg</sub> = 0.275~1.000, Ti = 0.04~0.60 apfu, T = 480~800 °C。

由于龙源坝花岗岩和白马山花岗岩均为过铝质特征<sup>[23,30-31,34]</sup>,且钛铁矿在这些岩石中较为常见,因此可以使用以上公式<sup>[8]</sup>。计算结果显示(图 5,表 1):(1)龙源坝黑云母花岗岩中黑云母 Ti 温度为 591~676 °C,平均 629 °C;二云母花岗岩中黑云母 Ti 温度为 563~613 °C,平均 584 °C。(2)龙潭含角闪石的黑云母花岗岩中黑云母 Ti 温度为 634~718 °C,平均 679 °C;小沙江黑云母花岗岩中黑云母 Ti 温度为 649~705 °C,平均 673 °C;暗色包体中黑云母 Ti 温度为 692~708 °C,平均 703 °C;龙藏湾二云母花岗岩中黑云母 Ti 温度为 599~643 °C,平均 630 °C。上述结果表明,暗色包体的黑云母 Ti 温度平均值最



表 1 龙源坝岩体和白马山岩体中黑云母的电子探针分析结果

Table 1 Chemical compositions of biotites from Longyuanba complex and Baimashan complex

岩性	样品号	$w_B/\%$													F=O =Cl	Total	FeO (calc)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (calc)
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl					
	08GN38-1-13	36.31	2.71	15.68	0.02	21.05	0.53	9.5	—	0.21	10.28	0.77	0.01	0.33	96.29	17.52	3.92	
	08GN38-1-14	36.69	2.79	15.56	0.04	21.08	0.48	9.44	—	0.06	10.31	0.65	—	0.27	96.45	17.34	4.16	
	08GN38-1-15	36.60	3.04	15.39	0.02	21.76	0.51	9.30	—	0.12	10.27	0.66	0.01	0.28	97.01	17.94	4.25	
	08GN38-1-18	36.85	2.68	15.42	0.02	21.23	0.45	9.86	0.05	0.13	10.27	0.68	0.01	0.29	96.96	17.74	3.88	
	08GN38-1-20	36.57	3.14	15.65	0.06	21.68	0.57	9.15	—	0.10	10.33	0.54	0.01	0.23	97.25	17.93	4.17	
	08GN38-1-25	36.05	3.10	15.80	—	22.63	0.56	8.39	0.02	0.13	10.2	0.84	0.03	0.36	96.88	18.54	4.54	
	08GN52-2-11	36.39	1.99	16.45	0.05	21.03	0.48	9.34	—	0.11	10.68	1.28	0.01	0.54	96.52	17.17	4.29	
	08GN52-2-17	36.22	1.90	16.72	0.03	21.01	0.58	9.16	0.02	0.17	10.54	0.96	0.02	0.41	96.35	17.24	4.20	
龙源坝印支期黑云母花岗岩	08GN52-2-18	36.58	2.22	16.57	0.02	21.46	0.40	9.20	0.02	0.13	10.56	1.08	0.01	0.46	97.16	17.49	4.41	
	08GN52-2-19	36.21	2.02	16.24	0.03	21.83	0.58	9.20	—	0.07	10.61	1.11	0.00	0.47	96.79	18.03	4.23	
	08GN52-2-24	36.52	2.24	16.33	0.02	21.25	0.48	8.92	0.01	0.10	10.57	1.00	0.01	0.42	96.44	17.34	4.35	
	08GN52-2-28	36.48	2.40	16.66	0.04	21.57	0.46	8.64	—	0.08	10.72	1.04	0.02	0.44	97.05	17.57	4.44	
	08GN52-2-3	36.57	2.09	16.91	0.05	20.98	0.46	9.27	0.07	0.10	10.37	0.89	0.01	0.38	96.87	17.31	4.08	
	08GN52-2-32	36.13	2.14	16.42	0.03	22.14	0.42	8.77	—	0.12	10.44	0.79	0.01	0.33	96.61	18.32	4.24	
	08GN52-2-33	36.27	2.20	16.33	0.03	22.33	0.62	8.52	0.02	0.05	10.31	0.79	—	0.33	96.68	18.43	4.34	
	08GN52-2-34	36.19	2.52	16.84	0.04	21.74	0.41	8.42	0.03	0.12	10.64	0.92	0.01	0.39	96.95	17.98	4.19	
	08GN52-2-36	36.33	2.02	16.77	0.04	21.51	0.54	9.10	0.01	0.09	10.35	0.74	0.00	0.31	96.76	17.78	4.14	
	08GN52-2-4	36.32	2.04	16.52	0.05	21.14	0.37	9.32	0.02	0.07	10.52	0.93	0.00	0.39	96.37	17.33	4.23	
	08GN52-2-5	35.20	2.31	16.20	0.02	20.96	0.50	8.67	0.00	0.05	10.52	0.84	0.00	0.35	94.43	17.44	3.91	
	08GN52-2-6	36.13	2.17	16.72	0.06	21.18	0.45	9.08	—	0.10	10.50	0.83	0.01	0.35	96.39	17.41	4.18	
	08GN52-2-7	36.20	2.36	16.34	0.01	22.06	0.43	8.79	0.02	0.14	10.42	0.73	0.01	0.31	96.77	18.26	4.22	

岩性	样品号	以 22 个 O 原子为基准的阳离子数												Fe <sup>2+</sup> / (Fe <sup>2+</sup> + Mg)	Mg/ (Mg + Fe)	Fe/ (Fe + Mg)	T/°C	
		Si	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr	Mn	Mg	Ba	Ca	Na					K
	08GN38-1-13	5.533	2.467	0.347	0.311	0.290	2.392	0.002	0.068	2.158	0.000	0.000	0.062	1.998	0.53	0.45	0.55	657
	08GN38-1-14	5.569	2.431	0.350	0.319	0.323	2.352	0.005	0.062	2.136	0.000	0.000	0.018	1.996	0.52	0.44	0.56	661
	08GN38-1-15	5.544	2.456	0.290	0.346	0.317	2.441	0.002	0.065	2.100	0.000	0.000	0.035	1.985	0.54	0.43	0.57	672
	08GN38-1-18	5.568	2.432	0.312	0.305	0.301	2.382	0.002	0.058	2.221	0.000	0.008	0.038	1.980	0.52	0.45	0.55	655
	08GN38-1-20	5.525	2.475	0.310	0.357	0.323	2.416	0.007	0.073	2.061	0.000	0.000	0.029	1.991	0.54	0.43	0.57	676
	08GN38-1-25	5.495	2.505	0.331	0.355	0.324	2.560	0.000	0.072	1.907	0.000	0.003	0.038	1.984	0.57	0.40	0.60	671
	08GN52-2-11	5.536	2.464	0.483	0.228	0.263	2.412	0.006	0.062	2.118	0.000	0.000	0.032	2.073	0.53	0.44	0.56	601
	08GN52-2-17	5.518	2.482	0.518	0.218	0.265	2.413	0.004	0.075	2.080	0.000	0.003	0.050	2.049	0.54	0.44	0.56	591
龙源坝印支期黑云母花岗岩	08GN52-2-18	5.525	2.475	0.472	0.252	0.286	2.424	0.002	0.051	2.072	0.000	0.003	0.038	2.035	0.54	0.43	0.57	619
	08GN52-2-19	5.519	2.481	0.434	0.232	0.251	2.532	0.004	0.075	2.091	0.000	0.000	0.021	2.063	0.55	0.43	0.57	602
	08GN52-2-24	5.556	2.444	0.482	0.256	0.300	2.403	0.002	0.062	2.023	0.000	0.002	0.029	2.051	0.54	0.43	0.57	621
	08GN52-2-28	5.524	2.476	0.495	0.273	0.303	2.427	0.005	0.059	1.950	0.000	0.000	0.023	2.071	0.55	0.42	0.58	630
	08GN52-2-3	5.518	2.482	0.523	0.237	0.306	2.341	0.006	0.059	2.085	0.000	0.011	0.029	1.996	0.53	0.44	0.56	608
	08GN52-2-32	5.513	2.487	0.463	0.246	0.280	2.544	0.004	0.054	1.995	0.000	0.000	0.036	2.032	0.56	0.41	0.59	611
	08GN52-2-33	5.529	2.471	0.461	0.252	0.309	2.537	0.004	0.080	1.936	0.000	0.003	0.015	2.005	0.57	0.40	0.60	614
	08GN52-2-34	5.490	2.510	0.499	0.288	0.304	2.454	0.005	0.053	1.904	0.000	0.005	0.035	2.059	0.56	0.41	0.59	638
	08GN52-2-36	5.509	2.491	0.504	0.230	0.294	2.434	0.005	0.069	2.057	0.000	0.002	0.026	2.002	0.54	0.43	0.57	601
	08GN52-2-4	5.526	2.474	0.486	0.233	0.283	2.407	0.006	0.048	2.114	0.000	0.003	0.021	2.042	0.53	0.44	0.56	605
	08GN52-2-5	5.490	2.510	0.465	0.271	0.272	2.463	0.002	0.066	2.016	0.000	0.000	0.015	2.093	0.55	0.42	0.58	630
	08GN52-2-6	5.500	2.500	0.497	0.248	0.286	2.409	0.007	0.058	2.061	0.000	0.000	0.030	2.039	0.54	0.43	0.57	616
	08GN52-2-7	5.510	2.490	0.439	0.270	0.290	2.519	0.001	0.055	1.995	0.000	0.003	0.041	2.023	0.56	0.42	0.58	628

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)

(续表 1)

岩性	样品号	$w_B/\%$													Total	FeO (calc)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (calc)	
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl	F=O =Cl				
龙源 坝印 支期 二云 母花 岗岩	08GN54-4-103	35.62	1.84	17.49	0.01	22.14	0.28	7.57	—	0.14	10.45	1.06	0.06	0.46	95.54	18.20	4.38	
	08GN54-4-106	34.69	1.70	17.77	0.06	22.44	0.25	7.91	0.08	0.18	9.70	0.74	0.07	0.33	94.78	18.60	4.27	
	08GN54-4-107	34.93	1.72	17.77	0.08	22.91	0.32	7.95	0.04	0.09	9.43	0.89	0.05	0.39	95.24	18.83	4.53	
	08GN54-4-110	35.39	1.96	17.63	—	22.20	0.23	7.82	—	0.10	10.34	1.06	0.06	0.46	95.67	18.25	4.39	
	08GN54-4-111	35.71	1.90	17.44	—	23.03	0.18	7.64	—	0.05	10.35	0.89	0.07	0.39	96.30	18.96	4.53	
	08GN54-1-57	35.63	1.77	17.65	0.03	21.67	0.40	7.83	—	0.07	10.59	1.09	0.02	0.46	95.64	17.68	4.44	
	08GN54-1-58	35.64	2.22	17.59	0.07	21.86	0.37	7.78	0.01	0.03	10.50	0.96	0.01	0.41	96.07	18.00	4.29	
	08GN54-1-59	35.40	2.02	17.84	0.00	21.79	0.38	7.76	—	0.06	10.63	0.91	0.01	0.39	95.88	17.88	4.34	
	08GN54-1-64	35.42	2.21	17.30	0.07	22.49	0.37	7.72	—	0.11	10.23	0.62	0.01	0.26	95.92	18.68	4.23	
	08GN54-1-65	35.72	2.00	17.81	—	22.44	0.39	7.51	—	0.10	10.35	0.70	0.02	0.30	96.32	18.74	4.11	
08GN54-1-66	35.49	1.87	16.94	—	23.55	0.44	7.56	—	0.07	10.51	0.66	0.01	0.28	96.43	19.77	4.19		
08GN54-1-67	35.04	1.85	17.41	—	24.15	0.32	7.10	—	0.04	10.50	0.65	0.02	0.28	96.41	20.34	4.23		
龙潭 含角 闪石 黑云 母花 岗岩	11HN09-2-5	36.83	2.38	15.98	0.03	20.63	0.21	9.12	0.04	0.11	10.45	0.38	0.01	0.16	95.77	17.17	3.84	
	11HN09-2-11	36.73	2.80	15.77	0.05	21.15	0.15	9.28	0.00	0.06	10.27	0.33	0.00	0.14	96.25	17.61	3.93	
	11HN09-2-12	36.48	2.94	15.35	0.07	21.17	0.23	9.04	0.01	0.23	10.35	0.29	0.03	0.13	95.86	17.73	3.82	
	11HN16-2-3	36.62	3.15	14.88	0.02	19.38	0.17	10.76	0.02	0.13	10.32	0.25	0.00	0.11	95.46	16.17	3.57	
	11HN16-2-4	36.83	3.53	14.92	0.04	19.55	0.15	10.80	0.00	0.05	10.47	0.24	0.01	0.10	96.35	16.26	3.66	
	11HN16-2-5	36.85	3.17	14.97	0.04	19.38	0.19	10.76	0.00	0.12	10.58	0.31	0.01	0.13	96.07	16.14	3.60	
	11HN16-2-8	36.18	3.20	14.68	0.03	20.29	0.18	11.19	0.00	0.10	9.53	0.20	0.01	0.09	95.38	17.02	3.64	
	11HN23-1-1	36.28	3.57	14.63	0.02	20.09	0.19	10.70	0.00	0.15	10.38	0.16	0.02	0.07	96.01	16.94	3.51	
	11HN23-1-2	35.97	3.07	14.74	0.03	20.15	0.19	10.70	0.00	0.09	10.42	0.30	0.00	0.13	95.34	16.99	3.51	
岩性	样品号	以 22 个 O 原子为基准的阳离子数													Fe <sup>2+</sup> / (Fe <sup>2+</sup> + Mg)	Mg/ (Mg + Fe)	Fe/ (Fe + T/°C Mg)	
		Si	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr	Mn	Mg	Ba	Ca	Na	K				
龙源 坝印 支期 二云 母花 岗岩	08GN54-4-103	5.488	2.512	0.661	0.213	0.312	2.541	0.001	0.037	1.739	0.000	0.000	0.042	2.054	0.59	0.38	0.62	576
	08GN54-4-106	5.404	2.596	0.664	0.199	0.178	2.746	0.007	0.033	1.837	0.000	0.013	0.054	1.928	0.60	0.39	0.61	563
	08GN54-4-107	5.393	2.607	0.624	0.200	0.338	2.621	0.010	0.042	1.830	0.000	0.007	0.027	1.857	0.59	0.38	0.62	563
	08GN54-4-110	5.444	2.556	0.638	0.227	0.310	2.546	0.000	0.030	1.793	0.000	0.000	0.030	2.029	0.59	0.39	0.61	591
	08GN54-4-111	5.471	2.529	0.618	0.219	0.318	2.632	0.000	0.023	1.745	0.000	0.000	0.015	2.023	0.60	0.37	0.63	581
	08GN54-1-57	5.477	2.523	0.672	0.205	0.303	2.483	0.004	0.052	1.794	0.000	0.000	0.021	2.077	0.58	0.39	0.61	570
	08GN54-1-58	5.452	2.548	0.621	0.255	0.327	2.470	0.008	0.048	1.774	0.000	0.002	0.009	2.049	0.58	0.39	0.61	613
	08GN54-1-59	5.434	2.566	0.659	0.233	0.301	2.496	0.000	0.049	1.776	0.000	0.000	0.018	2.082	0.58	0.39	0.61	596
	08GN54-1-64	5.444	2.556	0.575	0.255	0.320	2.571	0.008	0.048	1.769	0.000	0.000	0.033	2.006	0.59	0.38	0.62	612
	08GN54-1-65	5.457	2.543	0.661	0.230	0.328	2.537	0.000	0.050	1.710	0.000	0.000	0.030	2.017	0.60	0.37	0.63	591
08GN54-1-66	5.470	2.530	0.545	0.217	0.270	2.765	0.000	0.057	1.737	0.000	0.000	0.021	2.067	0.61	0.36	0.64	578	
08GN54-1-67	5.417	2.583	0.587	0.215	0.268	2.855	0.000	0.042	1.636	0.000	0.000	0.012	2.071	0.64	0.34	0.66	573	
龙潭 含角 闪石 黑云 母花 岗岩	11HN09-2-5	5.609	2.391	0.475	0.273	0.327	2.299	0.004	0.027	2.071	0.000	0.007	0.032	2.030	0.53	0.44	0.56	634
	11HN09-2-11	5.573	2.427	0.391	0.320	0.340	2.344	0.006	0.019	2.099	0.000	0.000	0.018	1.988	0.53	0.44	0.56	661
	11HN09-2-12	5.579	2.421	0.344	0.338	0.316	2.390	0.008	0.030	2.061	0.000	0.002	0.068	2.019	0.54	0.43	0.57	668
	11HN16-2-3	5.578	2.422	0.247	0.361	0.300	2.169	0.002	0.022	2.443	0.000	0.003	0.038	2.005	0.47	0.50	0.50	689
	11HN16-2-4	5.560	2.440	0.213	0.401	0.310	2.158	0.005	0.019	2.431	0.000	0.000	0.015	2.016	0.47	0.50	0.50	704
	11HN16-2-5	5.583	2.417	0.254	0.361	0.290	2.164	0.005	0.024	2.430	0.000	0.000	0.035	2.045	0.47	0.50	0.50	689
	11HN16-2-8	5.521	2.479	0.159	0.367	0.313	2.277	0.004	0.023	2.545	0.000	0.000	0.030	1.855	0.47	0.50	0.50	691
	11HN23-1-1	5.526	2.474	0.150	0.409	0.281	2.279	0.002	0.025	2.430	0.000	0.000	0.044	2.017	0.48	0.49	0.51	706
	11HN23-1-2	5.526	2.474	0.193	0.355	0.256	2.333	0.004	0.025	2.451	0.000	0.000	0.027	2.042	0.49	0.49	0.51	685

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)



(续表 1)

岩性	样品号	$w_B/\%$													Total	FeO (calc)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (calc)
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl	F=O =Cl			
龙潭含 角闪石 黑云母 花岗岩	11HN23-1-22	36.74	3.39	14.86	0.06	20.07	0.17	11.08	0.01	0.21	10.18	0.23	0.03	0.10	96.78	16.82	3.61
	11HN23-1-27	36.54	3.90	14.84	0.06	19.85	0.25	11.01	0.00	0.11	10.45	0.10	0.00	0.04	96.99	16.71	3.49
	11HN23-1-35	36.70	2.39	14.94	0.04	20.47	0.22	10.77	0.00	0.10	10.72	0.22	0.00	0.09	96.33	17.60	3.19
	11HN23-1-36	36.84	2.26	15.00	0.06	19.94	0.19	11.46	0.07	0.09	10.30	0.24	0.01	0.10	96.20	17.00	3.27
包体	11HN23-2-5	36.57	3.61	14.19	0.04	19.92	0.14	10.23	0.02	0.15	10.23	0.33	0.01	0.14	95.09	16.48	3.82
	11HN23-2-6	36.26	3.49	14.16	0.02	20.08	0.17	10.63	0.02	0.20	10.22	0.22	0.01	0.09	95.25	16.88	3.56
	11HN23-2-7	36.88	3.24	14.30	0.07	19.81	0.06	10.55	0.01	0.11	10.31	0.14	0.01	0.06	95.33	16.62	3.54
	11HN23-2-8	35.79	3.45	14.28	0.05	20.02	0.19	10.69	0.00	0.12	10.36	0.27	0.01	0.12	94.94	16.84	3.53
	11HN23-2-20	36.81	3.52	14.30	0.03	19.70	0.19	11.17	0.00	0.11	10.40	0.35	0.02	0.15	96.23	16.37	3.71
	11HN23-2-21	36.64	3.33	14.48	0.04	19.85	0.15	11.11	0.00	0.10	10.28	0.36	0.01	0.15	95.98	16.51	3.71
	11HN23-2-24	36.62	3.54	14.39	0.00	19.72	0.18	10.27	0.00	0.15	10.06	0.24	0.01	0.10	94.92	16.34	3.76
	11HN23-2-28	36.14	3.43	14.42	0.02	19.70	0.18	10.45	0.06	0.06	10.40	0.22	0.01	0.09	94.86	16.50	3.56
	11HN23-2-41	36.05	3.56	14.71	0.07	19.98	0.20	10.81	0.00	0.07	10.55	0.29	0.02	0.13	95.98	16.74	3.59
	11HN23-2-42	36.81	3.61	14.53	0.01	19.51	0.21	10.77	0.00	0.11	10.53	0.36	0.01	0.15	96.07	16.14	3.75
	11HN23-2-43	36.72	3.44	14.13	0.00	19.83	0.18	10.46	0.03	0.18	10.25	0.07	0.01	0.03	95.22	16.72	3.46
	11HN23-2-87	36.37	3.50	14.47	0.00	19.89	0.23	10.74	0.02	0.10	10.18	0.31	0.02	0.14	95.49	16.53	3.73
	11HN23-2-90	36.68	3.65	14.60	0.09	20.52	0.18	10.95	0.00	0.11	10.51	0.14	0.01	0.06	97.30	17.38	3.50
11HN23-2-92	37.17	3.52	14.79	0.03	20.15	0.21	10.90	0.03	0.14	10.38	0.33	0.02	0.14	97.30	16.72	3.81	
11HN23-2-93	37.01	3.51	14.51	0.00	20.00	0.23	10.58	0.00	0.10	10.52	0.24	0.01	0.10	96.46	16.68	3.68	
小沙江 黑云母 花岗岩	11HN19-1-38	36.56	2.98	16.30	0.01	19.59	0.29	9.59	0.00	0.11	10.37	0.07	0.01	0.03	95.80	20.68	1.72

岩性	样品号	以 22 个 O 原子为基准的阳离子数												Fe <sup>2+</sup> / (Fe <sup>2+</sup> + Mg)	Mg/ (Mg + Fe)	Fe/ (Fe + Mg)	T/°C	
		Si	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr	Mn	Mg	Ba	Ca	Na					K
龙潭含 角闪石 黑云母 花岗岩	11HN23-1-22	5.534	2.466	0.170	0.384	0.289	2.240	0.007	0.022	2.488	0.000	0.002	0.061	1.956	0.47	0.50	0.50	698
	11HN23-1-27	5.497	2.503	0.126	0.441	0.292	2.206	0.007	0.032	2.469	0.000	0.000	0.032	2.006	0.47	0.50	0.50	718
	11HN23-1-35	5.588	2.412	0.267	0.274	0.225	2.381	0.005	0.028	2.444	0.000	0.000	0.030	2.082	0.49	0.48	0.52	643
	11HN23-1-36	5.584	2.416	0.261	0.258	0.247	2.280	0.007	0.024	2.589	0.000	0.011	0.026	1.992	0.47	0.51	0.49	638
包体	11HN23-2-5	5.607	2.393	0.169	0.416	0.322	2.232	0.005	0.018	2.338	0.000	0.003	0.045	2.001	0.49	0.48	0.52	706
	11HN23-2-6	5.567	2.433	0.127	0.403	0.285	2.293	0.002	0.022	2.433	0.000	0.003	0.060	2.002	0.49	0.49	0.51	703
	11HN23-2-7	5.632	2.368	0.204	0.372	0.313	2.216	0.008	0.008	2.402	0.000	0.002	0.033	2.009	0.48	0.49	0.51	692
	11HN23-2-8	5.526	2.474	0.122	0.401	0.262	2.322	0.006	0.025	2.461	0.000	0.000	0.036	2.041	0.49	0.49	0.51	703
	11HN23-2-20	5.577	2.423	0.128	0.401	0.288	2.207	0.004	0.024	2.523	0.000	0.000	0.032	2.010	0.47	0.50	0.50	706
	11HN23-2-21	5.565	2.435	0.155	0.380	0.289	2.233	0.005	0.019	2.516	0.000	0.000	0.029	1.992	0.47	0.50	0.50	697
	11HN23-2-24	5.610	2.390	0.206	0.408	0.333	2.193	0.000	0.023	2.345	0.000	0.000	0.045	1.966	0.48	0.48	0.52	704
	11HN23-2-28	5.564	2.436	0.179	0.397	0.294	2.243	0.002	0.023	2.399	0.000	0.010	0.018	2.043	0.48	0.49	0.51	701
	11HN23-2-41	5.500	2.500	0.143	0.409	0.265	2.284	0.008	0.026	2.458	0.000	0.000	0.021	2.053	0.48	0.49	0.51	706
	11HN23-2-42	5.580	2.420	0.174	0.412	0.301	2.173	0.001	0.027	2.434	0.000	0.000	0.032	2.036	0.47	0.50	0.50	708
	11HN23-2-43	5.622	2.378	0.170	0.396	0.310	2.229	0.000	0.023	2.388	0.000	0.005	0.053	2.002	0.48	0.48	0.52	701
	11HN23-2-87	5.555	2.445	0.158	0.402	0.302	2.238	0.000	0.030	2.446	0.000	0.003	0.030	1.984	0.48	0.49	0.51	704
	11HN23-2-90	5.522	2.478	0.110	0.413	0.276	2.308	0.011	0.023	2.457	0.000	0.000	0.032	2.018	0.48	0.49	0.51	707
11HN23-2-92	5.566	2.434	0.174	0.397	0.304	2.219	0.004	0.027	2.433	0.000	0.005	0.041	1.983	0.48	0.49	0.51	702	
11HN23-2-93	5.597	2.403	0.181	0.399	0.306	2.222	0.000	0.029	2.385	0.000	0.000	0.029	2.030	0.48	0.49	0.51	702	
小沙江 黑云母 花岗岩	11HN19-1-38	5.540	2.460	0.449	0.340	0.333	2.149	0.001	0.037	2.166	0.000	0.000	0.032	2.005	0.50	0.47	0.53	675

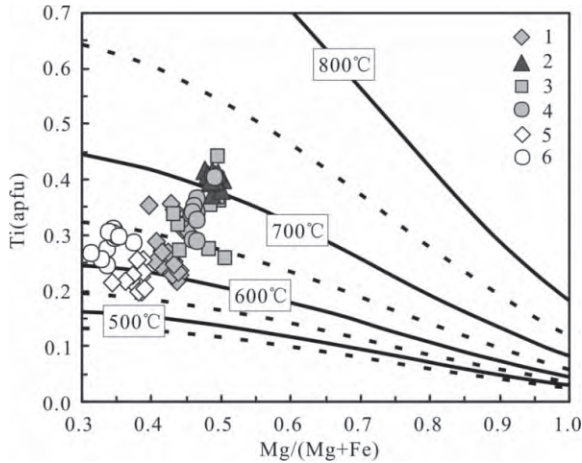
<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)

(续表 1)

岩性	样品号	$w_B/\%$													F=O =Cl	Total	FeO (calc)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (calc)	
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl						
小沙江黑云母花岗岩	11HN19-1-39	36.42	2.56	16.64	0.00	20.15	0.33	9.62	0.04	0.14	10.24	0.19	0.01	0.08	96.15	20.29	1.82		
	11HN19-1-40	36.62	1.25	17.50	0.04	19.64	0.29	10.69	0.00	0.09	9.97	0.38	0.00	0.16	96.08	16.50	3.48		
	11HN19-1-42	36.52	3.23	16.32	—	19.95	0.29	9.75	0.00	0.14	10.52	0.23	0.01	0.10	96.71	16.63	3.69		
	11HN19-1-43	36.73	3.01	16.62	0.00	20.23	0.33	9.62	0.01	0.10	10.33	0.12	0.00	0.05	96.97	16.95	3.64		
	11HN19-1-52	36.71	2.57	17.30	—	19.78	0.26	9.67	0.00	0.10	9.73	0.34	0.01	0.15	96.10	16.26	3.91		
	11HN19-1-53	37.19	3.14	16.66	0.01	20.03	0.25	9.64	0.00	0.10	10.04	0.12	0.01	0.05	97.06	16.60	3.81		
	11HN19-1-54	36.51	3.00	16.60	0.02	19.99	0.31	9.58	0.00	0.15	10.11	0.17	0.02	0.08	96.26	16.65	3.71		
	11HN19-1-55	37.04	3.56	14.48	0.00	20.03	0.23	10.88	0.01	0.09	10.23	0.18	0.00	0.08	96.55	16.73	3.67		
	11HN19-1-56	36.74	2.88	16.57	0.00	19.76	0.22	9.68	0.00	0.14	10.40	0.23	0.01	0.10	96.38	16.44	3.69		
11HN21-1-2	35.13	2.49	19.07	0.00	21.23	0.28	7.16	0.00	0.07	10.43	0.46	0.01	0.20	95.86	17.54	4.09			
龙藏湾二母花岗岩	11HN21-1-4	34.92	2.36	18.78	0.01	22.49	0.29	6.43	0.01	0.07	10.40	0.38	0.00	0.16	95.77	17.58	2.52		
	11HN21-1-5	34.58	2.63	18.57	0.06	22.22	0.35	6.61	0.00	0.13	10.33	0.35	0.01	0.15	95.48	17.12	2.89		
	11HN21-1-10	34.87	2.52	18.70	0.03	21.93	0.32	6.57	0.00	0.01	10.34	0.36	0.01	0.15	95.29	17.42	2.54		
	11HN21-1-11	34.60	2.65	18.46	0.00	22.47	0.35	6.72	0.00	0.06	10.37	0.27	0.00	0.11	95.69	17.90	2.31		
	11HN21-1-22	34.95	2.68	18.55	0.06	22.28	0.31	6.61	0.03	0.10	10.22	0.30	0.00	0.13	95.78	17.14	2.63		
	11HN21-1-24	34.76	2.56	18.42	0.00	22.15	0.33	6.77	0.00	0.08	10.17	0.37	0.00	0.16	95.23	17.41	2.68		
	11HN21-1-25	34.98	2.10	18.19	0.05	22.83	0.26	6.51	0.01	0.12	10.14	0.26	0.01	0.11	95.18	17.52	2.63		
	11HN21-1-26	34.15	2.19	18.74	0.00	23.54	0.31	6.49	0.03	0.15	10.18	0.27	0.00	0.11	95.76	18.34	2.43		
	11HN21-1-30	35.10	2.62	18.36	0.02	22.75	0.26	6.77	0.00	0.05	9.74	0.49	0.00	0.21	95.69	17.72	2.70		
	11HN21-1-31	34.70	2.62	18.46	0.00	22.33	0.33	6.43	0.00	0.10	10.26	0.29	0.00	0.12	95.23	17.58	2.69		
	11HN21-1-32	33.95	2.23	17.57	0.06	22.80	0.32	5.89	0.11	0.16	9.87	0.34	0.01	0.15	92.96	19.64	1.76		
	11HN21-1-35	35.21	2.56	18.18	0.02	21.66	0.39	6.69	0.00	0.11	10.28	0.30	0.01	0.13	95.09	20.90	1.77		
	以 22 个 O 原子为基准的阳离子数																		
	岩性	样品号														Fe <sup>2+</sup> /	Mg /	Fe /	T / °C
			Si	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr	Mn	Mg	Ba	Ca	Na	K	(Fe <sup>2+</sup> + Mg)	(Mg + Fe)	(Fe + Mg)	
小沙江黑云母花岗岩	11HN19-1-39	5.513	2.487	0.479	0.291	0.317	2.233	0.000	0.042	2.171	0.000	0.006	0.041	1.977	0.51	0.46	0.54	649	
	11HN19-1-40	5.513	2.487	0.616	0.142	0.290	2.183	0.005	0.037	2.399	0.000	0.000	0.026	1.915	0.48	0.49	0.51	—	
	11HN19-1-42	5.498	2.502	0.391	0.366	0.318	2.194	0.000	0.037	2.188	0.000	0.000	0.041	2.020	0.50	0.47	0.53	686	
	11HN19-1-43	5.507	2.493	0.442	0.339	0.335	2.201	0.000	0.042	2.150	0.000	0.002	0.029	1.976	0.51	0.46	0.54	673	
	11HN19-1-52	5.510	2.490	0.568	0.290	0.362	2.120	0.000	0.033	2.164	0.000	0.000	0.029	1.863	0.49	0.47	0.53	649	
	11HN19-1-53	5.542	2.458	0.466	0.352	0.365	2.131	0.001	0.032	2.141	0.000	0.000	0.029	1.909	0.50	0.46	0.54	679	
	11HN19-1-54	5.505	2.495	0.453	0.340	0.340	2.180	0.002	0.040	2.154	0.000	0.000	0.044	1.945	0.50	0.46	0.54	674	
	11HN19-1-55	5.586	2.414	0.158	0.404	0.316	2.210	0.000	0.029	2.446	0.000	0.002	0.026	1.968	0.47	0.49	0.51	705	
	11HN19-1-56	5.532	2.468	0.470	0.326	0.329	2.158	0.000	0.028	2.173	0.000	0.000	0.041	1.998	0.50	0.47	0.53	668	
11HN21-1-2	5.376	2.624	0.813	0.287	0.202	2.513	0.000	0.036	1.633	0.000	0.000	0.021	2.036	0.61	0.38	0.62	633		
龙藏湾二母花岗岩	11HN21-1-4	5.386	2.614	0.797	0.274	0.205	2.696	0.001	0.038	1.479	0.000	0.002	0.021	2.046	0.65	0.34	0.66	620	
	11HN21-1-5	5.353	2.647	0.738	0.306	0.200	2.677	0.007	0.046	1.525	0.000	0.000	0.039	2.040	0.64	0.35	0.65	641	
	11HN21-1-10	5.390	2.610	0.794	0.293	0.211	2.623	0.004	0.042	1.514	0.000	0.000	0.003	2.039	0.63	0.35	0.65	633	
	11HN21-1-11	5.351	2.649	0.713	0.308	0.199	2.708	0.000	0.046	1.549	0.000	0.000	0.018	2.046	0.64	0.35	0.65	642	
	11HN21-1-22	5.381	2.619	0.745	0.310	0.211	2.658	0.007	0.040	1.517	0.000	0.005	0.030	2.007	0.64	0.35	0.65	643	
	11HN21-1-24	5.383	2.617	0.742	0.298	0.207	2.660	0.000	0.043	1.563	0.000	0.000	0.024	2.009	0.63	0.35	0.65	637	
	11HN21-1-25	5.434	2.566	0.762	0.245	0.206	2.760	0.006	0.034	1.508	0.000	0.002	0.036	2.010	0.65	0.34	0.66	599	
	11HN21-1-26	5.305	2.695	0.734	0.256	0.181	2.878	0.000	0.041	1.503	0.000	0.005	0.045	2.018	0.66	0.33	0.67	607	
	11HN21-1-30	5.401	2.599	0.728	0.303	0.224	2.704	0.002	0.034	1.553	0.000	0.000	0.015	1.912	0.64	0.35	0.65	639	
	11HN21-1-31	5.383	2.617	0.755	0.306	0.208	2.688	0.000	0.043	1.487	0.000	0.000	0.030	2.030	0.64	0.34	0.66	640	
	11HN21-1-32	5.423	2.577	0.728	0.268	0.205	2.840	0.008	0.043	1.403	0.000	0.019	0.050	2.011	0.67	0.32	0.68	614	
	11HN21-1-35	5.447	2.553	0.759	0.298	0.212	2.591	0.002	0.051	1.543	0.000	0.000	0.033	2.029	0.63	0.36	0.64	637	

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)

高(平均 703 °C),其次为含角闪石黑云母花岗岩和黑云母花岗岩(WPG,龙源坝 629 °C;白马山 673~679 °C)中的黑云母,温度最低的是二云母花岗岩(SPG,龙源坝 584 °C;白马山 630 °C)中的黑云母。此外,整体上白马山岩体比龙源坝岩体的相应岩石的黑云母 Ti 温度更高(图 5)。



虚线代表中间 50 °C 区间温度值,1—龙源坝印支期黑云母花岗岩;2—暗色包体;3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩;4—小沙江黑云母花岗岩;5—龙源坝印支期二云母花岗岩;6—龙藏湾二云母花岗岩。

图 5 基于黑云母 Ti 和  $Mg/(Mg+Fe)$  值的等温线图 (据文献[8])

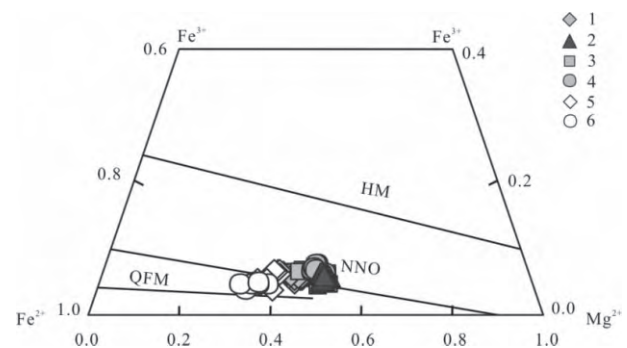
Fig. 5 Temperature isotherms calculated from the surface-fit equation on the Ti vs.  $Mg/(Mg+Fe)$  diagram

Wang 等<sup>[23]</sup>研究湖南印支期花岗岩时,根据花岗岩 Zr 含量计算了 Group 1 (相当于 SPG) 和 Group 2 (相当于 WPG) 花岗岩的 Zr 饱和温度分别为 734~786 °C 和 791~827 °C,明显高于我们的黑云母 Ti 温度,这是合理的,因为 Zr 饱和温度代表了岩浆熔融温度,而黑云母 Ti 温度则代表岩浆中黑云母结晶时的温度。两者之间明显的温度差异表明黑云母并不是岩浆的早期结晶相,或者没有分析到最早结晶的黑云母。下面的理由使得我们相信更可能的原因是黑云母并不是岩浆的早期结晶相:(1)所有黑云母的最高 Ti 温度明显低于 Zr 饱和温度;(2)即使是具有最高黑云母 Ti 温度的暗色包体,它们的黑云母 Ti 温度也明显低于最低的 Zr 饱和温度。因此,相同岩石类型中黑云母 Ti 温度的变化(通常 > 50 °C)应该反映的是岩浆温度的动态变化<sup>[11]</sup>。而同一岩体不同岩石类型之间黑云母 Ti 温度的差异(如龙源坝岩体黑云母花岗岩的黑云母 Ti 温度平均为 629 °C,而二云母花岗岩平均为 584 °C)可能与岩石的水含量有关,因为花岗质岩浆含水量越高,黑云

母的晶出温度越低<sup>[11,17]</sup>。相反,暗色包体黑云母 Ti 温度变化很小,很可能反映包体快速冷凝过程。但是,我们发现龙源坝和白马山岩体黑云母的 Ti 温度存在系统的差异,所有白马山岩体的各类岩石黑云母 Ti 温度比龙源坝岩体对应岩石的黑云母 Ti 温度系统高大约 50 °C。这种不同岩体之间黑云母 Ti 温度的系统差异用岩浆水含量的变化无法解释。一种可能的解释是它们结晶深度(压力)不同,实验岩石学研究表明,花岗质岩浆的固结温度随压力增大而降低。如果上述推理成立,那么龙源坝岩体的侵位深度很可能大于白马山岩体。

#### 4.2 岩浆氧逸度

除温度外,氧逸度条件是影响岩浆作用过程的又一重要因素<sup>[50-52]</sup>。Wones 等<sup>[3]</sup>通过研究与磁铁矿和钾长石共生的黑云母的  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  原子百分数来估算其结晶时的氧逸度(图 6)。同时,根据实验研究及理论计算,Wones 等<sup>[3]</sup>提出在  $p = 2\ 070$  bar 大气压条件下,基于黑云母稳定度 [ $100Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ ] 的  $lgf(O_2)-T$  图解(图 7),以此来定量评估与黑云母+透长石+磁铁矿平衡的岩浆的氧逸度,并得到了广泛的应用<sup>[2-3,9,11,14,16,18-20,27,53-54]</sup>。在黑云母的  $Fe^{2+}-Mg^{2+}-Fe^{3+}$  三角图解中(图 6),龙源坝黑云母花岗岩和白马山含角闪石黑云母花岗岩及其包体、黑云母花岗岩(WPG)中的黑云母投影点落在 NNO-HM 缓冲线之间,并靠近 NNO 缓冲线,而大多数龙源坝二云母花岗岩和白马山二云母花岗岩(SPG)中黑云母的投影点则落在 NNO-QFM 缓冲线之间,表明 WPG 的氧逸度比 SPG 的氧逸度更

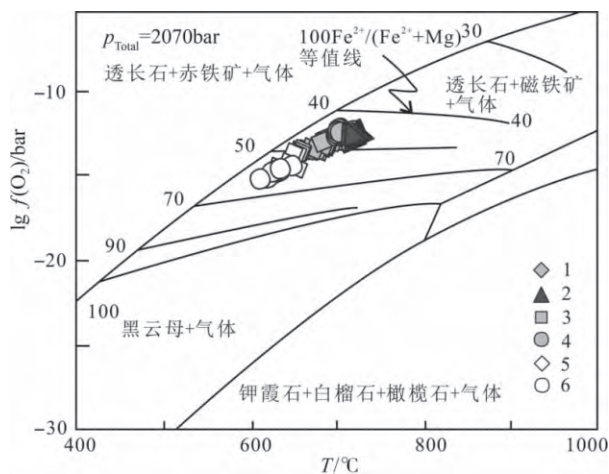


HM—赤铁矿—磁铁矿缓冲剂;NNO—Ni—NiO 缓冲剂;QFM—石英—铁橄榄石—磁铁矿缓冲剂。氧逸度按照 QFM-NNO-HM 从低到高变化。1—龙源坝印支期黑云母花岗岩;2—暗色包体;3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩;4—小沙江黑云母花岗岩;5—龙源坝印支期二云母花岗岩;6—龙藏湾二云母花岗岩。

图 6 黑云母  $Fe^{2+}-Mg^{2+}-Fe^{3+}$  图解 (据文献[3])

Fig. 6  $Fe^{2+}-Mg^{2+}-Fe^{3+}$  diagram for the biotite

高。此外,利用前述黑云母 Ti 温度作为与黑云母平衡的岩浆温度,将黑云母数据投影点在  $\lg f(\text{O}_2)$ - $T$  图解中(图 7),结果同样也显示 WPG 比 SPG 氧逸度更高:(1)龙源坝黑云花岗岩氧逸度介于  $10^{-14} \sim 10^{-13}$ ,二云母花岗岩氧逸度介于  $10^{-15.5} \sim 10^{-14}$ ; (2)龙潭含角闪石黑云母花岗岩氧逸度介于  $10^{-13.5} \sim 10^{-12}$ ,小沙江黑云母花岗岩氧逸度介于  $10^{-13.2} \sim 10^{-12}$ ,暗色包体氧逸度介于  $10^{-13.5} \sim 10^{-11.8}$ ,龙藏湾二云母花岗岩氧逸度介于  $10^{-15.8} \sim 10^{-14}$ 。



1—龙源坝印支期黑云母花岗岩;2—暗色包体;3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩;4—小沙江黑云母花岗岩;5—龙源坝印支期二云母花岗岩;6—龙藏湾二云母花岗岩。

图 7 在 2 070 bar 大气压条件下黑云母+透长石+磁铁矿平衡的  $\lg f(\text{O}_2)$ - $T$  图解

(据文献[3])

Fig. 7  $\lg f(\text{O}_2)$ - $T$  diagram for the biotite+sanidine+magnetite+gas equilibrium at  $p_{\text{total}}=2070$  bar

研究表明,随着岩浆演化,岩浆的  $\text{Fe}^{3+}$  增加,演化晚期岩石的氧逸度增高<sup>[53]</sup>。但是研究的岩体显示相反的演化趋势,高硅岩石(二云母花岗岩,SPG)的氧逸度低于低硅岩石(暗色包体和黑云母花岗岩,WPG),表明不同岩石类型之间不是演化关系。通常来自地幔的岩浆具有较高的氧逸度,而壳源沉积物形成的岩浆由于沉积物中一些还原物质的存在,如碳等,常常具有较低的氧逸度<sup>[55]</sup>。因此,同一岩体从暗色包体→黑云母花岗岩(WPG)→二云母花岗岩(SPM)氧逸度的逐渐降低或者是地幔岩浆演化过程中受到大比例沉积物质的混染,或者是幔源岩浆和壳源岩浆的混合。野外观察白马山岩体中存在暗色包体,表明更可能的原因是来自地幔的基性岩浆与地壳沉积物部分熔融形成的酸性岩浆之间岩浆混合关系。

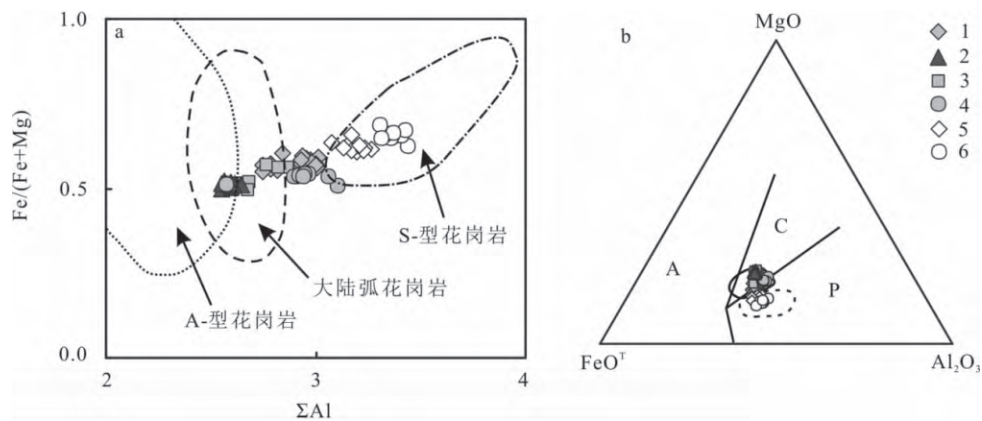
#### 4.3 黑云母化学成分对岩浆源区性质及构造背景制约讨论

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<sup>[2-3,9,11,19-20,53]</sup>,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。Abdel-Rahman<sup>[13]</sup>根据全球近 325 个黑云母样品的化学成分数据,系统总结了非造山的碱性岩系、俯冲有关的造山带钙碱性岩系和过铝质岩系的黑云母特征,并提出了基于黑云母化学成分的构造环境判别图。但是,Shabani 等<sup>[53]</sup>系统研究了加拿大阿巴拉契亚地区古生代不同成因花岗岩的黑云母地球化学特征,认为黑云母成分能够反映寄主岩浆岩的原始特征,但仅根据黑云母的化学成分不能判断岩浆岩形成的构造背景。为此,我们选用 Shabani 等<sup>[53]</sup>的  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\sum \text{Al}$  图和 Abdel-Rahman<sup>[13]</sup>判别效果最好的  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$  三角图(图 8)对研究的黑云母进行投图,讨论黑云母寄主花岗岩的源区性质和形成的构造背景。

在  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\sum \text{Al}$  图上(图 8a),暗色包体和含角闪石黑云母花岗岩的黑云母均落在大陆弧区,黑云母花岗岩中黑云母落在大陆弧与钛铁矿系列的 S-型花岗岩过渡区,而所有的二云母花岗岩中黑云母都落在钛铁矿系列的 S-型花岗岩区。在  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$  三角图上(图 8b),龙源坝岩体和白马山岩体的暗色包体以及含角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩(WPG)中的黑云母与华南其他印支期黑云母花岗岩中的黑云母均落在与俯冲相关的造山带钙碱性岩区域<sup>[11,27,56]</sup>,而二云母花岗岩同样与华南其他二云母花岗岩(SP)的黑云母投影点共同落在碰撞背景的过铝质岩石区域<sup>[11,27,56]</sup>。

上述不同岩石类型黑云母的地球化学特征表明,暗色包体和含角闪石的 WPG 中的黑云母都投在大陆弧或造山带钙碱性岩浆岩区,它们为典型的 I-型花岗岩,表明源区物质为火成岩或地幔基性岩浆和少量地壳酸性岩浆的混合产物<sup>[13,53]</sup>。SPG 均投在典型的 S-型花岗岩和过铝质岩石中,表明源区物质主要为纯的沉积物质。介于其间的是不含角闪石的 WPG,黑云母投在过渡区表明或者源区是地幔和地壳物质的混合源,或者是地幔岩浆和地壳岩浆混合产物。上述不同类型岩石形成时间相近,并且出现代表岩浆混合的重要地质证据的暗色包体,支持岩浆混合的观点。

研究的印支期花岗岩体各类岩石形成时间相



1—龙源坝印支期黑云母花岗岩; 2—暗色包体; 3—龙潭含角闪石黑云母花岗岩; 4—小沙江黑云母花岗岩; 5—龙源坝印支期二云母花岗岩; 6—龙藏湾二云母花岗岩。图 b 中实线框为沅山岩体唐市含角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩和贵东岩体鲁溪黑云母花岗岩中的黑云母数据; 虚线框为沅山岩体巷子口二云母花岗岩和贵东岩体下庄二云母花岗岩中的黑云母数据, 数据引自文献[11, 27]; A—非造山的碱性杂岩(多为 A 型花岗岩); C—造山带钙碱性杂岩(多为 I 型花岗岩); P—过铝质岩套(包括碰撞型和 S 型花岗岩)。

图 8 黑云母  $Fe/(Fe+Mg)-\Sigma Al$  图(a)和  $FeO^T-Al_2O_3-MgO$  图(b)

(a 据文献[53], b 据文献[13])

Fig. 8  $Fe/(Fe+Mg)-\Sigma Al$  diagram (a) and  $FeO^T-Al_2O_3-MgO$  diagram (b) for the biotite

近, 空间上密切共生, 因此它们不可能形成于不同的构造背景。在 Abdel-Rahman<sup>[13]</sup> 的判别图上(图 8b)暗色包体和 WPG 与 SPG 分别落在不同的构造分区, 表明该图在判断研究区花岗岩的构造分区上是存在问题的。正如 Shabani 等<sup>[53]</sup> 所言, 黑云母的化学成分可以较为有效地判断寄主花岗岩的源区性质, 而不适合判断花岗岩形成的构造背景。

总之, 根据华南两类印支期花岗岩(WPG 和 SPG)的黑云母化学成分研究, 华南印支期具弱过铝质特征的 WPG 是地幔基性岩浆和地壳酸性岩浆混合的产物, 因此具有相对高温、高氧逸度的特征, 而具强过铝质特征的 SPG 来自接近纯地壳沉积物质部分熔融产物(相对富水), 因此具有相对低温、低氧逸度的特征。

## 5 结论

(1) 华南印支期黑云母花岗岩及其包体(WPG)中黑云母富镁、贫铝、贫铁, 属镁质黑云母, 而二云母花岗岩(SP)中黑云母贫镁、富铝、富铁, 属铁质黑云母。

(2) 同一岩体 WPG 黑云母结晶温度相对较高, 而 SPG 黑云母结晶温度相对较低可能是受岩石中水含量高低的影响, 而不同岩体之间系统的温度差异更可能是受侵位深度的影响。

(3) WPG 黑云母具有相对高的氧逸度是由于

源岩主要为幔源物质, 而 SPG 黑云母氧逸度相对较低是因为源区物质主要为沉积物。

(4) WPG 与 SPG 时空上密切共生不是形成的构造背景不同所致, 而是岩石成因差别造成。因此, 花岗岩的黑云母化学成分可以较好的判断花岗岩的源区性质, 而不能单独用来判断花岗岩形成的构造背景。

审稿专家提出的宝贵建设性修改意见对提高本文质量发挥了重要作用, 在此谨表衷心感谢!

## 参考文献

- [1] Borodina N S, Fershtater G B, Votyakov S L. The oxidation ratio of iron in coexisting biotite and hornblende from granitic and metamorphic rocks: The role of  $p$ ,  $T$ , and  $f(O_2)$ [J]. The Canadian Mineralogist, 1999, 37(6): 1423-1429.
- [2] Zhao K D, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. Mineral chemistry of the Qitianling granitoid and the Furong tin ore deposit in Hunan Province, South China: Implication for the genesis of granite and related tin mineralization[J]. European Journal of Mineralogy, 2005, 17(4): 635-648.
- [3] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: Experiment theory and application[J]. American Mineralogist, 1965, 50(9): 1228-1271.
- [4] Jacobs D C, Parry W T. Geochemistry of biotite in the Santa Rita porphyry copper deposit, New Mexico[J]. Economic Geology, 1979, 74(4): 860-887.



- [5] Speer J A. Micas in igneous rocks[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 13: 299-356.
- [6] Lalonde A E, Bernard P. Composition and color of biotite from granites: Two useful properties in characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay Orogen, Northwest Territories[J]. *Canadian Mineralogist*, 1993, 31: 203-217.
- [7] Aydin F, Karsli O, Sadiklar M B. Mineralogy and chemistry of biotites from Eastern Pontide granitoid rocks, NE-Turkey: Some petrological implications for granitoid magmas [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2003, 63(2): 163-182.
- [8] 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]. *American Mineralogist*, 2005, 90(2/3): 316-328.
- [9] 胡建, 邱检生, 王汝成, 等. 广东龙窝和白石冈岩体锆石 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*, 2006, 22(10): 2464-2474.
- [10] Uchida E, Endo S, Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resource Geology*, 2007, 57(1): 47-56.
- [11] 丁兴, 孙卫东, 汪方跃, 等. 湖南沅山岩体多期云母的 Rb-Sr 同位素年龄和矿物化学组成及其成岩成矿指示意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 3823-3840.
- [12] 周作侠. 侵入岩的铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1988(3): 63-73.
- [13] Abdel-Rahman A F M. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(2): 525-541.
- [14] 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 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*, 2007, 23(10): 2605-2614.
- [15] 李鸿莉, 毕献武, 涂光炽, 等. 骑田岭岩体黑云母中挥发性组分的演化特征及对锡成矿的指示[J]. *矿物学报*, 2007(增刊): 195-197.
- [16] 李鸿莉, 毕献武, 涂光炽, 等. 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*, 2007, 27(3): 49-54.
- [17] René M, Holtz F, Luo C, et al. Biotite stability in peraluminous granitic melts: Compositional dependence and application to the generation of two-mica granites in the South Bohemian batholith (Bohemian Massif, Czech Republic) [J]. *Lithos*, 2008, 102(3/4): 538-553.
- [18] 朱碧, 蒋少涌, 丁昕, 等. 江西永平铜矿区花岗岩热液蚀变与岩石成因: 矿物化学、元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1900-1916.
- [19] 刘彬, 马昌前, 刘园园, 等. 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*, 2010, 29(2): 151-165.
- [20] 章健, 陈卫锋, 陈培荣. 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*, 2011, 35(2): 270-277.
- [21] 东前, 杜杨松, 曹毅, 等. 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.
- [22] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [23] Wang Y J, Fan W M, Sun M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 2007, 96(3/4): 475-502.
- [24] 郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 等. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(3): 457-472.
- [25] 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 等. 湖南阳明山岩体的 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 1065-1077.
- [26] 徐夕生, 邓平, O'Reilly S Y, 等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICP-MS U-Pb 定年及其成岩意义[J]. *科学通报*, 2003, 48(12): 1328-1334.
- [27] Chen Y W, Bi X W, Hu R Z, et al. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiazhuang granites in Guangdong Province, China: Implications for U mineralization[J]. *Lithos*, 2012, 150: 119-134.
- [28] Yu J H, O'Reilly S Y, Zhao L, et al. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: A geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic study[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 90(3/4): 271-300.
- [29] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 332-335.
- [30] 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(7): 873-893.
- [31] 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 南岭龙源坝复式岩体的地球化学特征研究[J]. *铀矿地质*, 2006, 22(6): 336-344.
- [32] 王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 等. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(6): 491-499.
- [33] 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 南岭东段龙源坝复式岩体 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 984-994.
- [34] He Z Y, Xu X S, Niu Y L. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China[J]. *Lithos*, 2010, 119(3/4): 621-641.
- [35] 李华芹, 王登红, 陈富文, 等. 湖南雪峰山地区铲子坪和大

- 坪金矿成矿作用年代学研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 900-905.
- [36] 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 282-290.
- [37] 陶继华, 李武显, 李献华, 等. 赣南龙源坝地区燕山期高分异花岗岩年代学、地球化学及锆石 Hf-O 同位素研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(5): 760-778.
- [38] 湖南省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报. 一, 区域地质. 第 8 号, 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-664.
- [39] 刘建清, 谢渊, 赵瞻, 等. 湖南雪峰山地区白马山花岗岩年代学特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 25-35.
- [40] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182.
- [41] Chu Y, Lin W, Faure M, et al. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, central South China: Implications from U-Pb age and Lu-Hf determinations of granites [J]. Lithos, 2012, 150: 243-255.
- [42] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981-991.
- [43] 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, 24(2): 155-162.
- [44] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada[J]. The Canadian Mineralogist, 2000, 38(2): 455-470.
- [45] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 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.
- [46] Froster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral mica[J]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1980, 354: 11-49.
- [47] Whitney J A. The origin of granite: The role and source of water in the evolution of granitic magmas[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(12): 1886-1897.
- [48] Patiño Douce A E. Titanium substitution in biotite: An empirical model with applications to thermometry,  $O_2$  and  $H_2O$  barometries, and consequences for biotite stability [J]. Chemical Geology, 1993, 108(1/2/3/4): 133-162.
- [49] Henry D J, Guidotti C V. Titanium in biotite from metapelitic rocks: Temperature effects, crystal-chemical controls, and petrologic applications[J]. American Mineralogist, 2002, 87(4): 375-382.
- [50] Carmichael I S E. The redox states of basic and silicic magmas: A reflection of their source regions[J]? Contributions to Mineralogy and Petrology, 1991, 106(2): 129-141.
- [51] 马鸿文. 硅酸盐岩浆的  $Fe^{3+}$ - $Fe^{2+}$  平衡与氧逸度[J]. 地质科技情报, 1991, 10(3): 17-23.
- [52] Wilke M, Behrens H. The dependence of the partitioning of iron and europium between plagioclase and hydrous tonalitic melt on oxygen fugacity[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 137(1/2): 102-114.
- [53] Shabani A A T, Lalonde A E, Whalen J B. Composition of biotite from granitic rocks of the Canadian Appalachian Orogen: A potential tectonomagmatic indicator [J]? Canadian Mineralogist, 2003, 41: 1381-1396.
- [54] 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等. 华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用: 矿物化学、元素和同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2509-2516.
- [55] Whalen J B, Chappell B W. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan fold belt, Southeast Australia[J]. American Mineralogist, 1988, 73(3/4): 281-296.
- [56] 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 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, 2010, 29(4): 355-363.