

# 桂北新寨角闪花岗岩角闪石矿物化学特征及其指示意义

胡荣国, 刘楚晴, 冯佐海, 赵义来, 蔡永丰, 刘奕志, 夏志鹏

(桂林理工大学 地球科学学院, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 对桂北新寨侵入岩体中的角闪花岗岩进行了详细的偏光显微镜观察和系统的矿物化学研究, 并在此基础上, 基于电子探针分析结果选取共生的角闪石和斜长石, 估算了该岩体侵位时的温压条件、氧逸度和含水量。岩相特征观察显示, 新寨角闪花岗岩中主要发育有自形、未蚀变半自形/他形和强交代半自形/他形 3 种主要类型的角闪石, 是岩浆侵位过程中在不同深度的结晶产物或交代蚀变产物。电子探针研究结果显示, 新寨花岗岩中角闪石成分变化较大, 且在岩浆侵位过程中呈现出  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^T$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量降低但  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$  含量升高的趋势。矿物温压计估算结果显示自形和未蚀变半自形/他形角闪石的结晶压力分别为 0.28~0.30 GPa 和 0.19~0.26 GPa, 对应的结晶温度分别为 767~783℃ 和 740~764℃。温压计算结果表明新寨岩体初始侵位深度应大于 11.3 km, 且侵位过程是一个近乎等温降压的过程, 变压结晶作用为新寨侵入体持续侵位过程中的主要结晶方式。角闪石结晶时具有较高的氧逸度, 变化范围在  $\Delta\text{NNO} + 0.1(\log f_{\text{O}_2} = -13.5)$  到  $\Delta\text{NNO} + 0.5(\log f_{\text{O}_2} = -12.9)$  之间。角闪石结晶时熔体含水量为 4.9%~6.4%, 但在侵位到中地壳 7.0~9.5 km 时经历了由于降压引起的流体出溶。角闪石化学组成指示其母岩浆属于钙碱性的中酸性岩浆, 来源于壳幔混合, 且在侵位过程中不断有壳源物质加入。

**关键词:** 新寨花岗岩; 角闪石全铝压力计; 角闪石-斜长石温度计; 结晶温度; 侵位深度

**中图分类号:** P578.955; P588.12<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2020)06-0703-15

## The composition of amphibole in northern Guangxi and its implications for the magma evolution of the Xinzhai amphibole granite

HU Rong-guo, LIU Chu-qing, FENG Zuo-hai, ZHAO Yi-lai, CAI Yong-feng, LIU Yi-zhi and  
XIA Zhi-peng

(College of Earth Sciences and Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Detailed petrographic observation and systematic mineralogical chemistry studies of the Xinzhai granite from the north Guangxi were performed in this paper. Based on electron microprobe analysis (EMPA) data, the authors calculated pressure, temperature, oxygen fugacities ( $\log f_{\text{O}_2}$ ) and  $\text{H}_2\text{O}$  in co-existent melts conditions of the crystallization of these granites. According to the petrographic features, there are three types of amphiboles in Xinzhai amphibole granite, i. e., euhedral amphibole, unaltered subhedral/anhydral amphiboles and strongly metasomatized subhedral/anhydral amphiboles, which are products of crystallization or metasomatic alteration of the Xinzhai intrusion formed at different depths and stages in the process of emplacement. The EMPA results show that

收稿日期: 2020-04-14; 接受日期: 2020-08-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572191, 41703054); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFCA380022, 2017GXNSFBA198164, 2019GXNSFDA24009)

作者简介: 胡荣国(1982-), 男, 汉族, 副教授, 博士, 地球化学专业, E-mail: hurongguo@glut.edu.cn。

the major element compositions of amphibole in Xinzhai granites are varied depending on crystal morphology, characterized by the decreasing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}^T$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  but increasing of  $\text{MgO}$  and  $\text{SiO}_2$  during magmatic emplacement. The values of crystallization pressures estimated from aluminium-in-amphibole barometry of the euhedral amphibole and unaltered subhedral/anedral amphiboles are 0.28 ~ 0.30 and 0.19 ~ 0.26 GPa respectively, indicating that the emplacement depth of the Xinzhai pluton should be greater than 11.3 km. Furthermore, the corresponding crystallization temperatures of emplacement calculated with the amphibole-plagioclase thermometry and amphibole thermometry of the euhedral amphibole and unaltered subhedral/anedral amphiboles are 767 ~ 783°C and 740 ~ 764°C respectively. Based on the  $p$ - $T$  conditions of the pluton crystallization, it is suggested that the Xinzhai pluton experienced isothermal decompression and polybaric crystallization during the emplacement. The calculated oxygen fugacities of the unaltered amphiboles are in the range of  $\Delta\text{NNO} + 0.1$  ( $\log f_{\text{O}_2} = -13.5$ ) ~  $\Delta\text{NNO} + 0.5$  ( $\log f_{\text{O}_2} = -12.9$ ), indicating a relatively high oxygen fugacity. Moreover, the fractional crystallization enriched the water content of the residual melt (4.9% ~ 6.4%) and experienced exolved aqueous fluids when the evolved magma intruded into the shallower depth (7.0 ~ 9.5 km) mainly due to depressurization. Genetic mineralogy studies show that amphibole in the Xinzhai granite belongs to calc-alkaline intermediate and acid magma, which was likely derived from a crust-mantle mixed origin and continuously contaminated by crust materials in the process of emplacement.

**Key words:** Xinzhai granite; Al-in-hornblende geobarometer; amphibole-plagioclase thermometer; crystallization temperature; emplacement depth

**Fund support:** National Natural Science Foundation Project (41572191, 41703054); Natural Science Foundation of Guangxi (2016GXNSFCA380022, 2017GXNSFBA198164, 2019GXNSFDA24009)

华南加里东期岩浆活动强烈,广泛分布早古生代加里东期的强过铝质花岗质侵入体(王德滋, 2004; Li *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013)。定量地获得该期岩浆岩形成过程中的物理化学条件,对于估算岩体侵位深度或火山岩岩浆房深度,示踪岩浆源区及形成环境、反演岩浆演化过程和成岩构造背景等方面有重要地质意义。研究表明,对于许多造山环境下形成的钙碱性花岗侵入体而言,其中的角闪石在很大温度压力范围内具有较好的稳定性( $p = 0.1 \sim 2.3$  GPa,  $t = 400 \sim 1\ 150^\circ\text{C}$ ),且其Al含量通常随着侵位深度的增加而升高,是一种理想的地质压力计(Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Anderson, 1996)。此外,由于在角闪石系列矿物中广泛存在着Si-Al-Fe-Ti、 $\text{Fe}^{2+}$ -Mg-Mn以及 $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$ 等多元素的同像替换,在不同成岩条件下形成的角闪石亚类,其化学成分的变化能够提供岩浆结晶过程中压力、温度、氧逸度和熔体水含量等重要信息,因此被广泛应用到花岗质侵入体岩浆来源和成岩成矿演化研究中(Blundy and Holland, 1990; 马昌前等, 1994; Stein and Dietl, 2001; 吕志成等, 2003; 张拴宏等, 2007; Anderson *et al.*, 2008; Molina *et*

*al.*, 2009; Ridolfi *et al.*, 2010; Ridolfi and Renzulli, 2012; 陆丽娜等, 2011; 周晔等, 2013; Dada, 2014; Erdmann *et al.*, 2014; 汪洋, 2014; Mutch *et al.*, 2016; Putirka, 2016; 吴欢欢等, 2019)。

桂北新寨花岗质侵入体是一个出露面积较小的半隐伏岩体,前人对该侵入体的岩石成因、侵入时代和动力学意义等方面开展过研究工作并取得了一些进展(张相训等, 1993; 唐专红等, 2003; 贾小辉等, 2017),但目前尚未进行过针对该侵入体的矿物学研究以及基于矿物化学特征的岩浆来源、岩浆性质等相关研究。本文主要应用电子探针分析新寨花岗岩中角闪石和长石的化学组成,结合详细的显微镜下观察,估算角闪石结晶时熔体的温度、压力、氧逸度和含水量,来厘定该侵入体温压条件,并进一步揭示其岩浆性质和来源,为探讨该地区加里东期花岗岩成因和岩浆演化史提供新的地质信息。

## 1 地质背景及样品描述

新寨花岗质侵入体位于桂林市灵川县大镜乡漓江-新寨-踏板石一带,老厂穹隆的北端,大地构造位置上位于扬子地块和华夏地块的结合部位,安化-罗

城断裂和郴州-临武断裂之间(图1a), 区域上受控于近南北向的大镜-沙子断裂, 呈不规则勺状北北向展布, 主要为中酸性岩浆岩, 出露面积约  $16.7 \text{ km}^2$  (图1b)。野外观察显示, 新寨花岗质侵入体与围岩寒武系石英砂岩呈侵入接触关系, 两者侵入接触面平直, 界限清晰, 接触面倾向围岩, 倾角变化范围较大, 在  $35^\circ \sim 75^\circ$  之间(图2a)。岩石地球化学研究结果显示, 新寨花岗质侵入体具有高硅、富碱、富钾、强过铝质等特点, 属于S型花岗岩, 可能是元古宙地壳变质泥岩部分熔融的产物(张相训等, 1993); LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示中细粒斑状角闪黑云二长花岗岩的形成的时代为中奥陶世( $465 \pm 2 \text{ Ma}$ , 贾小辉等, 2017)。

新寨花岗质侵入体共由5个侵入体组成(图1b), 根据岩相学及相互接触关系和花岗岩岩石谱系划分原则, 唐专红等(2003)将这5个侵入体划分为踏板石单元(ST)和新寨单元(SX), 出露的岩性主要为中细粒角闪花岗岩、细粒黑云二长花岗岩和中细粒斑状黑云角闪花岗岩。在野外可以观察到中细粒角闪花岗岩和细粒黑云二长花岗岩以脉动式侵入到

中细粒斑状黑云角闪花岗岩中(唐专红等, 2003), 暗示它们之间的侵位时间相近。本次采集的样品1701-2来自侵入体最北部的踏板石单元, 样品1704-3则采自新寨单元(图1b), 两者都为中细粒角闪花岗岩, 新鲜面呈灰白色, 花岗结构, 块状构造(图2b、2c)。岩石主要由斜长石( $30\% \sim 35\%$ )、钾长石( $25\% \sim 30\%$ )、石英( $25\% \sim 30\%$ )、角闪石( $5\% \sim 10\%$ )和少量黑云母( $<1\%$ )组成, 偶见白云母。角闪石有多种形态, 从自形、半自形到他形均有发育, 正交偏光镜下呈浅黄色、绿色或淡蓝色。部分自形角闪石横截面呈六边形, 可见  $56^\circ$  两组解理, 交代作用不明显(图2d); 部分半自形/他形角闪石交代作用不明显(图2e), 但部分边部被强绿泥石化黑云母环绕交代(图2f), 或被石英严重交代呈港湾状(图2g)。斜长石呈自形-半自形, 多与钾长石交互共生(图2h), 部分晶形完好者可观察到卡纳双晶(图2i)。钾长石呈半自形板状, 有时可见卡斯巴双晶, 多高岭土化、泥化, 表面呈尘土状。石英呈他形粒状, 裂纹发育, 未见波状消光。副矿物主要有锆石、磷灰石、榍石、电气石以及铁氧化物。

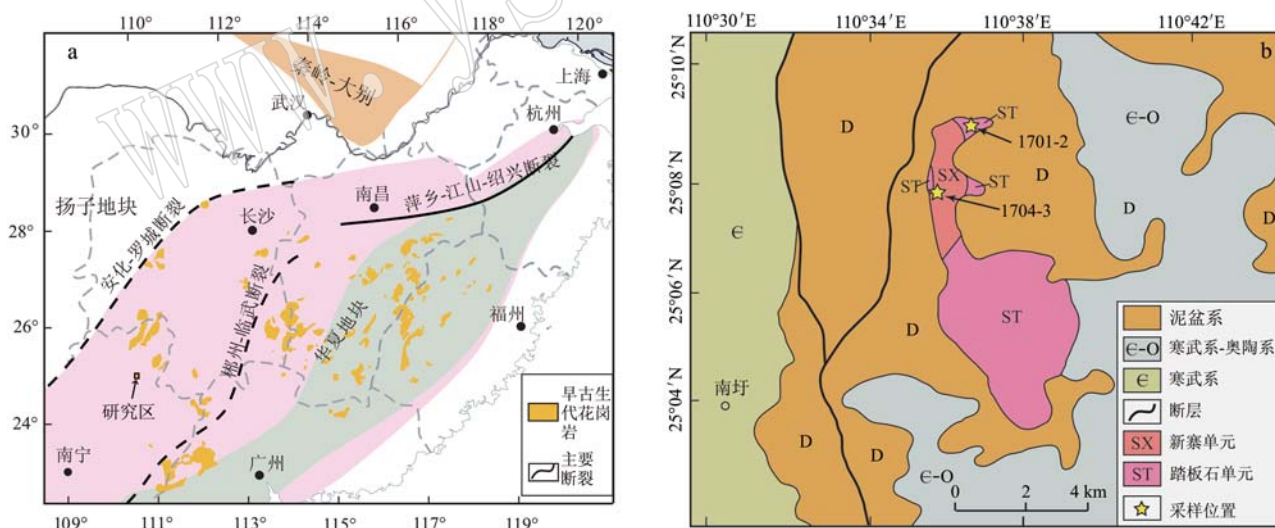


图1 华南早古生代花岗岩分布简图(a)和桂北新寨花岗质侵入体地质简图(b)[据贾小辉等(2017)修改]

Fig. 1 Schematic map showing the distribution of early Paleozoic igneous rocks in South China (a) and geological map of Xinzhai granite with sample locations also indicated (b) (modified after Jia Xiaohui *et al.*, 2017)

## 2 样品选择和实验技术

岩相学观察结果显示新寨角闪花岗岩中角闪石发育有3种产状: 第1种是自形角闪石, 颗粒较大,

端面较清晰, 大多独立出现, 没有明显交代的痕迹(图2d), 反映出早期结晶矿物的形态特点; 第2种是交代作用不明显的半自形-他形角闪石, 颗粒粗大, 端面较为清晰(图2e), 可能比自形晶角闪石结晶稍晚; 第3种是被绿泥石或石英强交代的半自形-



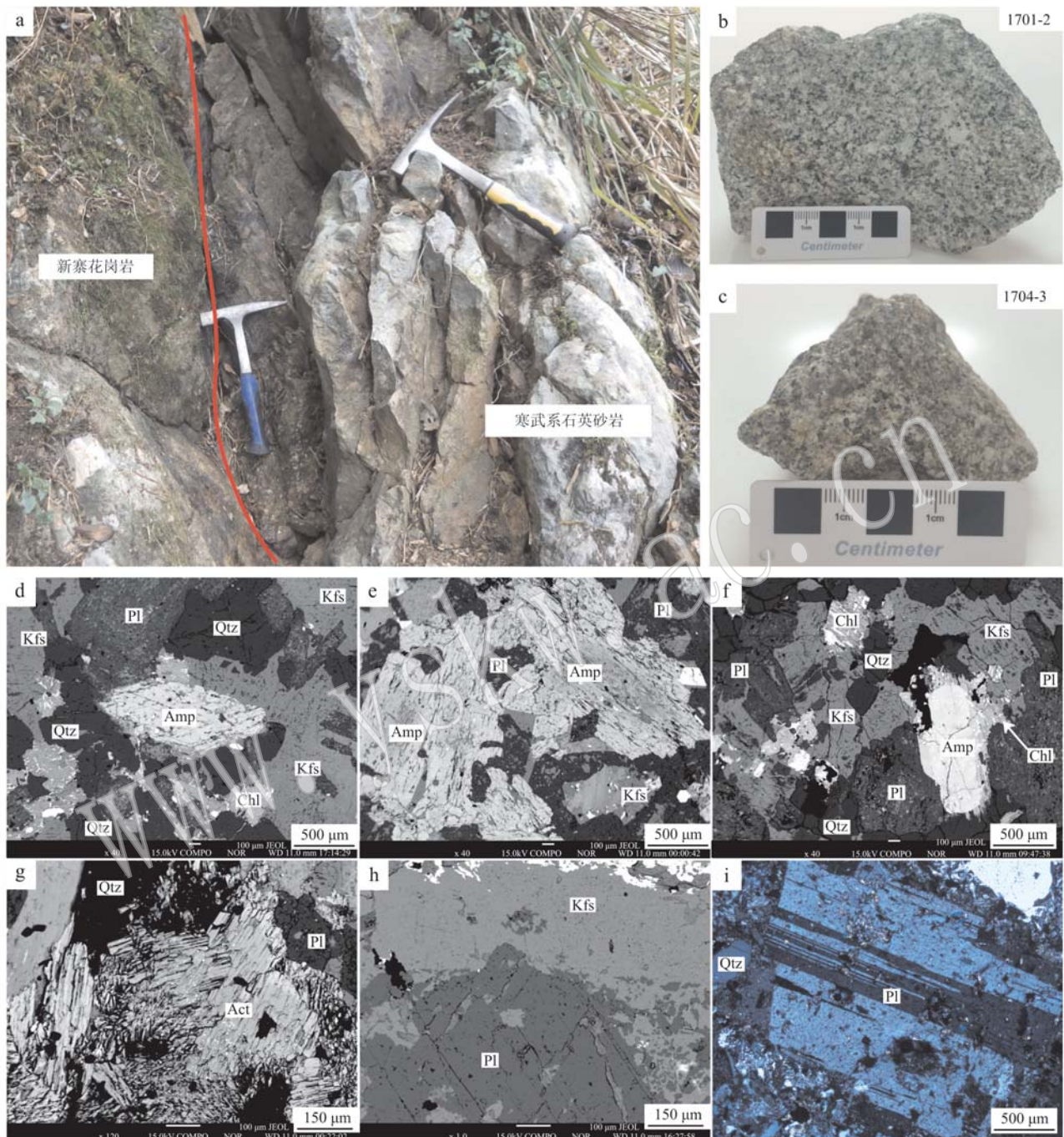


图2 桂北新寨花岗岩野外、手标本及显微岩相学特征照片

Fig. 2 Photographs showing field contact relationship, hand specimens and microphotographs showing representative texture of the Xinzhai hornblende granites

a—花岗岩侵入到寒武系石英砂岩中；b、c—中细粒角闪花岗岩手标本；d—与石英、长石共生的自形角闪石（BSE）；e—半自形角闪石，交代作用不明显（BSE）；f—边部被强绿泥石化黑云母交代的半自形角闪石（BSE）；g—被石英严重交代呈港湾状的他形阳起石（BSE）；h—交互共生的钾长石和斜长石（BSE）；i—斜长石中卡纳双晶（正交偏光）；Amp—角闪石；Act—阳起石；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Chl—绿泥石；Qtz—石英（沈其韩，2009）

a—intrusive contact observed between Cambrian quartz sandstone and Xinzhai hornblende granite; b, c—characteristics of the hand specimens of the medium-to fine-grained amphibole granite; d—euhedral amphibole intergrowth with feldspar and quartz (BSE); e—subhedral amphibole (BSE); f—subhedral amphibole rim replaced by intensively chloritized biotite on the margin (BSE); g—anhedral amphiboles partially replaced by quartz (BSE); h—intergrowth potassium feldspar and plagioclase (BSE); i—plagioclase possessing Carlsbad-albite compound twin (CPL); Amp—amphibole; Act—actinolite; Kfs—potassium feldspar; Pl—plagioclase; Chl—chlorite; Qtz—quartz (after Shen Qihan, 2009)

他形角闪石,普遍端面不清晰且颗粒较小,发育绿泥石反应边(图2f)或呈现出港湾结构(图2g),可能是第1种和第2种角闪石被后期热液交代的产物。本次研究选取了这3种不同产状的角闪石分别进行了电子探针成分分析,以期能够获得岩浆在不同演化阶段相应的温度、压力、氧逸度以及含水量等重要地质信息。本文角闪石和长石的矿物测试分析工作在桂林理工大学地球科学学院电子探针分析实验室完成,仪器型号为JEOL JXA8300型电子探针仪,加速电压15 kV,探针电流20 nA,作用时间20~30 s,束斑直径2~5  $\mu\text{m}$ ,ZAF法校正。选取共生的斜长石和角闪石进行矿物对分析,所有用于温压计算的角闪石皆与石英或碱性长石接触,角闪石测点位于与石英或长石互相接触的角闪石边部,斜长石测点位于与角闪石共生的斜长石边部,以满足角闪石全铝压力计(Johnson and Rutherford, 1989; Stein and Diete, 2001; Mutch *et al.*, 2016)以及角闪石-斜长石温度计(Holland and Blundy, 1994; Putirka, 2016)应用的前提条件。角闪石分子式的计算采用Holland和Blundy(1994)提出的23个氧原子法及电价平衡计算方法,其中 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 比值采用Droop电价平衡法(Droop, 1987)。

### 3 矿物地球化学特征

#### 3.1 角闪石

新寨角闪花岗岩中角闪石的电子探针成分分析结果列于表1。花岗岩中的角闪石类型主要包括由岩浆结晶作用所形成的结晶角闪石以及成岩作用后期发生交代蚀变的角闪石,而区分角闪石的不同类型是探讨其寄主岩石成因指示意义的前提。新寨花岗岩中不同形态的角闪石在化学成分上有一定的区别,其中自形角闪石相对富 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (7.76%~8.09%)、 $\text{FeO}^T$ (16.18%~17.87%)、 $\text{Na}_2\text{O}$ (1.44%~1.65%)、 $\text{TiO}_2$ (0.82%~0.98%)和 $\text{K}_2\text{O}$ (0.70%~0.95%),贫 $\text{MgO}$ (10.04%~11.23%)和 $\text{SiO}_2$ (45.33%~46.63%);被强绿泥石化黑云母或石英交代的半自形/他形角闪石则富 $\text{MgO}$ (12.54%~18.92%)和 $\text{SiO}_2$ (50.33%~55.80%),贫 $\text{FeO}^T$ (6.78%~14.10%);未被交代的半自形/他形角闪石成分则介于二者之间(表1、图3)。角闪石分子式计算结果显示 $(\text{Ca} + \text{Na})_B$ 变化于1.88~2.00之间, $\text{Na}_B$ 介于0.02~0.18之间,表明岩体中的角闪石均

属于钙质角闪石(Leake, 1997)。根据国际矿物协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会推荐的角闪石命名方法(Leake *et al.*, 1997),自形角闪石属于浅闪石(edenite),未蚀变半自形/他形角闪石属于镁普通角闪石(magnesiohornblende),而交代的半自形/他形角闪石属于阳起石(actinolite)(图4)。

新寨花岗岩中不同形态的角闪石在背散射图片下显示出明显的成分变化(图2c~2d),说明部分角闪石化学成分遭受到了后期流体蚀变交代的改造。Leake曾经提出岩浆成因的角闪石 $\text{Si} < 7.30 \text{ a. p. f. u.}$ ,而非岩浆成因或遭受过热液改造的角闪石 $\text{Si} > 7.30 \text{ a. p. f. u.}$ (Leake, 1971)。新寨花岗岩中自形角闪石和未被交代的半自形/他形角闪石的 $\text{Si} = 6.86 \sim 7.29 \text{ a. p. f. u.}$ ,在马昌前等(1994)提出的角闪石Ti-Si变异图解上,落在中酸性侵入岩中角闪石的区域内(图5);被石英或绿泥石化黑云母交代的半自形/他形角闪石(阳起石)的Si则为 $7.57 \sim 7.87 \text{ a. p. f. u.}$ ,落在蚀变或交代角闪石的区域内(图5),与镜下观察结果一致,说明这些角闪石结晶后遭受了后期热液的改造或蚀变,因此不能用来估算角闪石结晶时母岩浆熔体的物理化学条件。

#### 3.2 长石

新寨花岗岩中与角闪石共生的既有斜长石,也有钾长石。电子探针成分分析结果显示,斜长石从核部到边部钙和钠的含量未显示出明显的变化。斜长石 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量较为均匀,介于2.89%~4.57%之间; $\text{CaO}$ 含量介于6.18%~12.08%; $\text{K}_2\text{O}$ 含量非常低,为0.04%~0.85%,所有斜长石均为拉长石( $\text{An}_{50 \sim 69} \text{Ab}_{31 \sim 49} \text{Or}_{0 \sim 1}$ );钾长石成分较为均匀, $\text{K}_2\text{O}$ 含量为13.75%~16.58%; $\text{Na}_2\text{O}$ 含量较低,为0.30%~2.19%; $\text{CaO}$ 含量非常低,介于0.00%~0.05%。钾长石主要为微斜长石,少量为透长石( $\text{An}_0 \text{Ab}_{3 \sim 19} \text{Or}_{81 \sim 97}$ )(图6)。

### 4 讨论

#### 4.1 岩浆结晶的物理化学条件

##### 4.1.1 压力

角闪石全铝压力计是估算钙碱性花岗质侵入体结晶压力和侵位深度的重要手段,尤其在有共存的角闪石-斜长石矿物对的情况下,其估算结果更为可靠(Anderson and Smith, 1995)。角闪石全铝压力计的理论基础是相律,即在岩浆结晶过程中,角闪石的

表 1 新寨花岗岩角闪石电子探针分析结果  
Table 1 Electron microprobe analyses of representative amphibole from the Xinzhai granites

$w_V/\%$

样品号 名称 测点号	1701-2 浅闪石					1704-3 浅闪石					1701-2 镁普通角闪石					1704-3 镁普通角闪石					1701-2 阳起石					1704-3 阳起石				
	49*	71*	18*	19*	31*	93*	108*	110*	180*	184*	57*	69	72	30	44	95	98	171	173	178	52	65	73	39	42	82	103	104	165	177
SiO <sub>2</sub>	46.04	46.23	46.01	46.41	45.86	45.90	45.99	45.33	46.63	46.15	47.69	47.82	47.63	47.18	48.02	47.37	47.24	47.94	48.54	50.78	53.64	55.03	55.80	50.33	50.99	52.09	52.93	50.61	50.18	52.90
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.94	0.98	0.90	0.96	0.97	0.82	0.87	0.86	0.98	0.77	0.71	0.79	0.73	0.68	0.68	0.59	0.77	0.61	0.73	0.29	0.30	0.05	0.03	0.13	0.20	0.07	0.29	0.15	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.08	8.06	7.98	8.09	7.82	7.91	7.96	8.03	7.95	7.76	7.23	6.79	7.15	7.27	7.08	6.29	7.15	6.38	5.88	6.77	4.06	2.57	2.53	1.07	4.20	3.46	3.29	3.02	4.34	2.17
FeO <sup>T</sup>	16.45	16.54	17.67	16.18	17.87	17.55	16.86	17.61	16.49	17.21	14.65	14.81	14.99	14.51	15.71	15.84	15.27	14.35	14.93	14.13	11.41	11.64	9.66	6.78	14.10	13.46	12.02	12.41	13.69	9.85
MnO	0.29	0.29	0.29	0.36	0.39	0.40	0.40	0.47	0.37	0.23	0.35	0.34	0.31	0.29	0.42	0.43	0.32	0.36	0.44	0.28	0.28	0.36	0.45	0.44	0.35	0.52	0.48	0.45	0.37	0.22
MgO	11.15	11.01	10.44	10.96	10.20	10.47	11.23	10.04	11.01	10.66	12.65	12.83	12.40	12.18	12.11	12.50	13.36	13.60	12.94	13.96	14.92	15.39	16.60	18.92	12.57	12.84	13.33	14.31	12.54	15.99
CaO	12.06	12.18	12.11	12.05	12.08	12.13	12.13	12.04	12.25	11.73	11.75	11.65	11.92	12.07	11.95	12.00	11.91	11.81	11.57	11.49	12.11	11.56	11.82	12.42	12.11	12.30	12.13	11.91	12.27	11.01
Na <sub>2</sub> O	1.44	1.59	1.52	1.60	1.65	1.55	1.58	1.53	1.55	1.59	1.19	1.13	1.15	1.17	1.16	1.23	1.06	1.17	1.20	1.13	0.67	0.63	0.59	0.32	0.82	0.71	0.54	0.65	0.86	0.43
K <sub>2</sub> O	0.88	0.83	0.81	0.79	0.95	0.90	0.75	0.79	0.70	0.90	0.71	0.66	0.70	0.74	0.62	0.56	0.65	0.59	0.60	0.58	0.35	0.21	0.18	0.09	0.30	0.25	0.25	0.23	0.29	0.18
total	97.25	97.67	97.81	97.33	97.78	97.78	97.72	96.71	97.81	97.21	96.97	96.74	97.04	96.14	97.75	96.89	97.55	96.94	96.71	97.63	94.86	96.30	96.90	95.87	94.90	94.73	94.21	96.2	95.12	92.9
Si	6.91	6.89	6.91	6.95	6.91	6.90	6.85	6.90	6.96	6.95	7.08	7.12	7.08	7.07	7.10	7.10	7.00	7.11	7.23	7.12	7.53	7.79	7.85	7.94	7.56	7.65	7.77	7.73	7.57	7.87
Al <sup>IV</sup>	0.99	1.01	0.98	0.95	0.98	0.99	1.06	1.00	0.95	0.94	0.83	0.80	0.83	0.85	0.82	0.83	0.93	0.80	0.71	0.80	0.44	0.18	0.14	0.05	0.42	0.33	0.22	0.24	0.41	0.11
Al <sup>VI</sup>	0.44	0.41	0.43	0.48	0.41	0.41	0.34	0.44	0.45	0.44	0.43	0.39	0.42	0.44	0.41	0.28	0.32	0.31	0.33	0.37	0.27	0.26	0.28	0.12	0.32	0.29	0.36	0.28	0.35	0.27
Ti	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02
Fe <sup>T</sup>	2.07	2.06	2.22	2.03	2.25	2.21	2.10	2.24	2.06	2.17	1.82	1.84	1.86	1.82	1.94	1.98	1.89	1.78	1.86	1.73	1.42	1.41	1.15	0.81	1.77	1.69	1.50	1.52	1.71	1.23
Mn	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07	0.06	0.06	0.05	0.03
Mg	2.50	2.44	2.34	2.44	2.29	2.35	2.49	2.28	2.45	2.39	2.80	2.85	2.75	2.72	2.67	2.79	2.95	3.01	2.87	3.05	3.30	3.33	3.53	4.01	2.81	2.87	2.96	3.11	2.79	3.55
Ca	1.94	1.94	1.95	1.93	1.95	1.95	1.93	1.96	1.96	1.89	1.87	1.86	1.90	1.94	1.89	1.93	1.89	1.88	1.85	1.81	1.92	1.80	1.81	1.89	1.95	1.98	1.94	1.86	1.97	1.76
Na	0.42	0.46	0.44	0.46	0.48	0.45	0.46	0.45	0.45	0.46	0.34	0.33	0.33	0.34	0.33	0.36	0.31	0.34	0.35	0.32	0.19	0.18	0.16	0.09	0.24	0.21	0.16	0.18	0.25	0.12
K	0.17	0.16	0.16	0.15	0.18	0.17	0.14	0.15	0.13	0.17	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.07	0.04	0.03	0.02	0.06	0.05	0.04	0.06	0.03	0.03
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	2.07	1.87	2.22	2.03	2.25	2.21	1.79	2.24	2.06	2.17	1.82	1.84	1.86	1.82	1.94	1.98	1.89	1.78	1.86	1.73	1.42	1.41	1.15	0.81	1.77	1.69	1.50	1.52	1.71	1.23
Fe <sup>3+/(Fe<sup>3+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)</sup>	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.18	0.16	0.09	0.05	0.02	0.06	0.14	0.03	0.12	0.12
Fe <sup>3+/(Mg+Fe<sup>T</sup>)</sup>	0.45	0.46	0.49	0.45	0.45	0.48	0.46	0.50	0.46	0.48	0.39	0.39	0.40	0.40	0.42	0.42	0.39	0.37	0.39	0.36	2.00	1.98	1.97	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.88
<i>t</i> <sub>944</sub> /°C	709	716	715	696	703	719	730	714	691	688																				
<i>t</i> <sub>940</sub> /°C	694	696	727	722	721	726	737	722	692	728																				
<i>t</i> <sub>16</sub> /°C	775	783	768	778	768	771	782	767	772	768	763	754	759	763	749	749	761	761	740	761										
<i>p</i> <sub>16</sub> /GPa	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.30	0.29	0.28	0.25	0.23	0.25	0.26	0.24	0.21	0.25	0.21	0.19	0.23										
<i>D</i> <sub>16</sub> /km	11.1	11.0	10.9	11.1	10.7	10.8	10.8	11.3	10.8	10.5	9.3	8.5	9.2	9.5	9.0	7.8	9.1	7.8	7.0	8.3										
ANNO	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.5	0.1	0.3	0.3	1.0	1.2	0.9	0.8	0.9	1.1	1.4	1.4	1.2	1.5										
log <i>f</i> <sub>O<sub>2</sub></sub>	-13.0	-13.1	-13.5	-13.2	-13.5	-13.3	-12.9	-13.4	-13.3	-13.5	-13.0	-13.1	-13.1	-13.1	-13.4	-13.2	-12.4	-12.8	-13.6	-12.8										
H <sub>2</sub> O <sub>meq</sub>	5.8	5.9	6.0	6.2	5.5	5.7	5.8	6.3	6.3	5.5	5.7	5.4	5.7	5.9	6.0	5.1	5.2	4.9	5.0	5.2										

注: *t*<sub>944</sub>和 *t*<sub>940</sub> 据 Holland 和 Blundy(1994); *t*<sub>16</sub> 据 Putirka (2016); *p*<sub>16</sub> 据 Munch 等(2016); 氧逸度 (ANNO 和 log *f*<sub>O<sub>2</sub></sub>) 计算基于 Ridolfi 等(2010); *D*<sub>16</sub> 为 *p*<sub>16</sub> 对应的深度; \*用于角闪石-斜长石温度计算的数据点。

表 2 新寨花岗岩斜长石和钾长石探针分析结果  
Table 2 Electron microprobe analyses of representative plagioclase and K-feldspar from the Xinzhai granites

Table 2 Electron microprobe analyses of representative plagioclase and K-feldspar from the Xinzhai granites																						$w_B/\%$
样品号	1701-2					1704-3					1701-2					1704-3						
	拉长石					拉长石					微斜长石					微斜长石						
	1 *	2 *	3 *	4 *	5 *	12 *	13 *	18 *	19 *	20 *	12 *	13	14	19	20	21						
SiO <sub>2</sub>	63.05	64.53	65.31	65.58	65.41	64.10	64.58	64.72	64.29	64.41	64.99	65.48	66.10	65.06	65.19							
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.26	22.71	19.75	20.13	19.97	21.00	20.23	20.60	20.99	26.94	18.65	18.54	18.67	18.41	18.31							
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.04	0.03	0.03	0.00							
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
CaO	8.06	9.23	12.01	12.08	10.62	10.07	10.61	9.67	10.81	6.18	0.03	0.05	0.03	0.03	0.00							
Na <sub>2</sub> O	4.41	2.93	3.01	2.98	4.22	3.15	4.01	2.89	4.57	2.90	0.36	1.91	2.19	1.60	0.30							
K <sub>2</sub> O	0.08	0.04	0.09	0.10	0.09	0.04	0.11	0.85	0.08	0.10	16.58	13.75	13.88	14.92	16.47							
total	98.86	99.44	100.17	100.87	100.30	98.36	99.53	98.73	100.75	100.52	100.69	99.76	100.89	100.05	100.28							
Si	2.93	3.02	3.04	3.03	3.01	3.03	3.00	3.05	2.93	2.97	2.99	3.01	3.00	2.99	3.01							
Al	1.27	1.25	1.08	1.1	1.08	1.17	1.11	1.14	1.13	1.46	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00							
Ca	0.40	0.46	0.60	0.60	0.52	0.51	0.53	0.49	0.53	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Na	0.40	0.27	0.27	0.27	0.38	0.29	0.36	0.26	0.40	0.26	0.03	0.17	0.19	0.14	0.03							
K	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.97	0.82	0.80	0.87	0.97							
An	0.50	0.63	0.68	0.69	0.58	0.64	0.59	0.61	0.56	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Or	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01	0.97	0.82	0.81	0.86	0.97							
Ab	0.49	0.36	0.31	0.31	0.42	0.36	0.40	0.33	0.43	0.45	0.03	0.17	0.19	0.14	0.03							

\* 用于角闪石-斜长石温度计算的数据点。

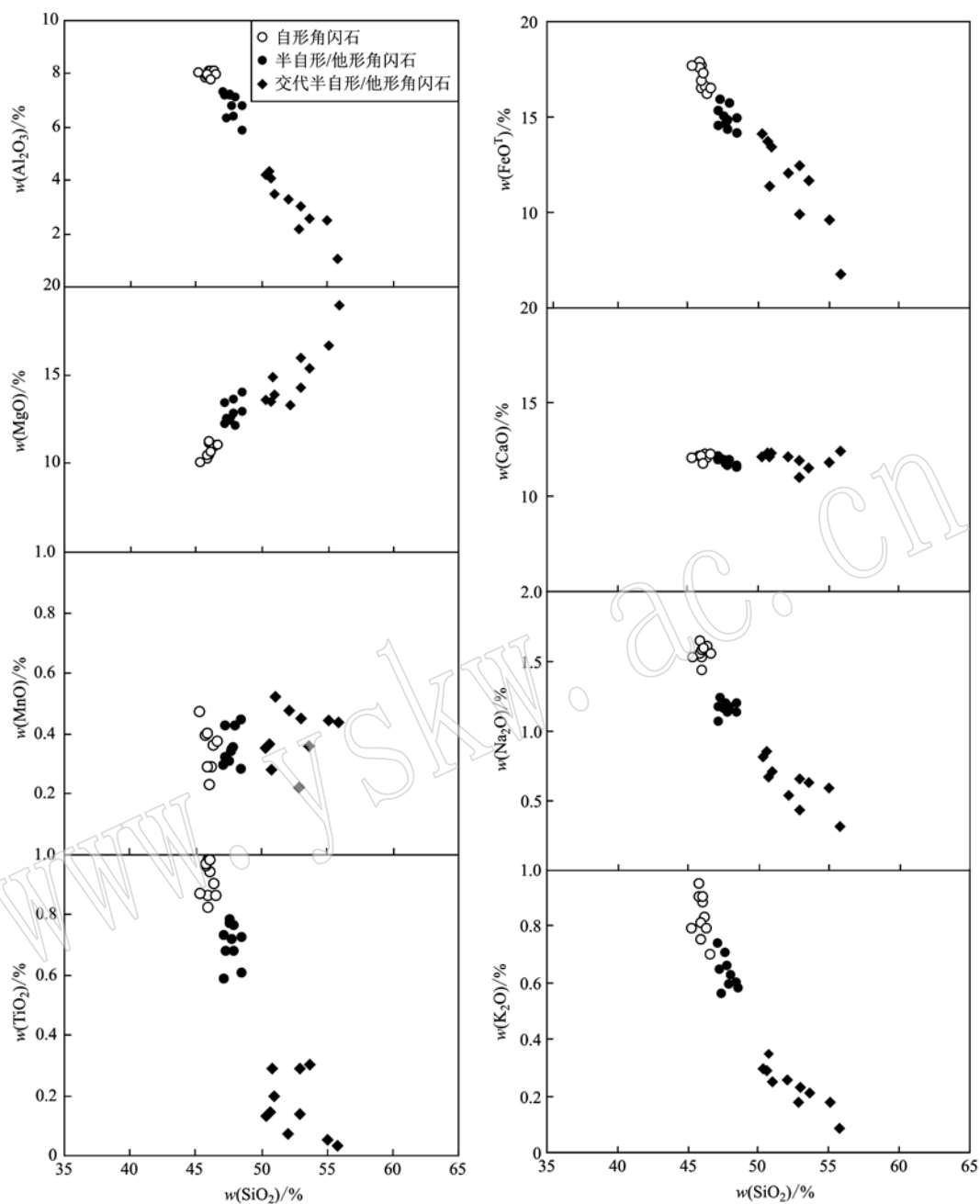


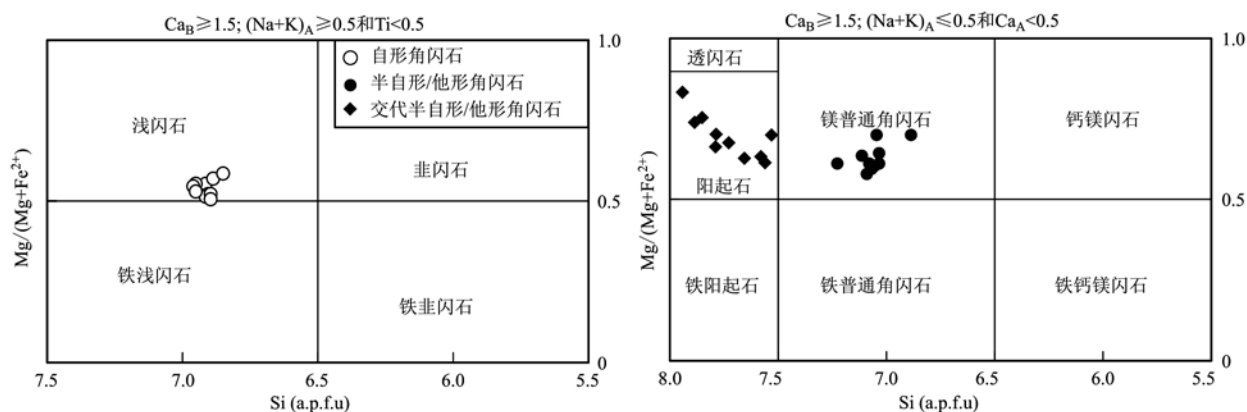
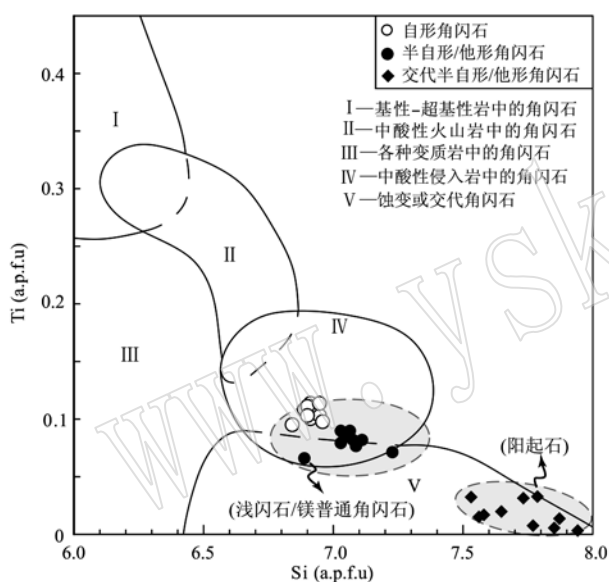
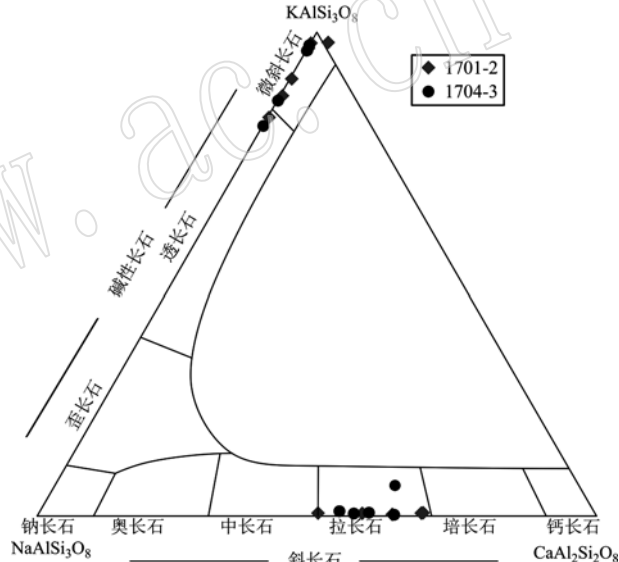
图 3 桂北新寨花岗岩角闪石矿物化学成分图解

Fig. 3 The diagram of mineral chemistry composition of amphiboles

生长过程能够很好地记录岩浆从熔体到晶体的结晶过程,晶体-熔体平衡是该结晶过程的起点,晶体平衡则为终点;而在晶体-晶体平衡时,基质中的角闪石或角闪石斑晶边部的结晶条件接近于固相线条件,这时与多相矿物平衡共生的角闪石结晶条件更接近于固相线条件,其结晶条件可视为岩浆的固结条件,代表了岩浆侵位的深度条件。此外,角闪石全  $\text{Fe}^T/(\text{Mg} + \text{Fe}^T)$  值范围在 0.45 ~ 0.50 的范围内,但

铝压力计对用于计算的平衡共生的矿物化学成分也有一定的要求,其中斜长石的  $\text{An}$  值应该在 25 ~ 35 之间,角闪石  $\text{Fe}^T/(\text{Mg} + \text{Fe}^T)$  值范围在 0.40 ~ 0.65 内 (Anderson and Smith, 1995),  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}) \geq 0.2$  (Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Schmidt, 1992)。尽管本次角闪石电子探针分析结果显示未蚀变的自形角闪石 (浅闪石) 的  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$  值却小于 0.2 (表 1),所以上述



图4 桂北新寨花岗岩角闪石分类图解(据 Leake *et al.*, 1997)Fig. 4 Classification of amphiboles of the Xinzhai granites (after Leake *et al.*, 1997)图5 桂北新寨花岗岩角闪石 Ti-Si 变异图解  
(据马昌前等, 1994)Fig. 5 Ti-Si variation diagram of amphiboles  
(after Ma Changqian *et al.*, 1994)图6 新寨花岗岩长石化学成分图解(底图据 Smith  
和 Mackenzie, 1958)Fig. 6 Feldspar chemical compositions of the Xinzhai granites  
(after Smith and Mackenzie, 1958)

压力计并不适合新寨花岗岩角闪石的压力计算。

Mutch 等 (2016) 经过实验模拟, 提出了另外一个新的全铝压力计计算公式, 该公式综合考虑了流体、温度和氧逸度等因素对压力的影响, 对  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$  值没有严格要求, 且共生的角闪石 ( $\text{Mg}/[\text{Mg} + \text{Fe}^T] = 0.32 \sim 0.81$ ) 和长石 ( $\text{An}_{15 \sim 80}$ ) 成分应用范围也非常广, 新寨花岗岩中的角闪石成分参数满足上述前提条件。根据该公式, 估算出新寨花岗岩中自形角闪石压力  $p_{16}$  为  $0.28 \sim 0.30$  GPa, 对应的形成深度  $D_{16}$  为  $10.5 \sim 11.3$  km (基于地壳密度

为  $2700 \text{ kg/m}^3$ , 下同); 未蚀变半自形/他形角闪石压力为  $0.19 \sim 0.26$  GPa, 对应的形成深度为  $7.0 \sim 9.5$  km (表 1)。

在岩浆侵位的过程中, 由于围岩温度要显著低于岩浆, 因此岩浆驻留于任一岩浆房都会冷却, 不同的矿物在该深度水平上会发生降温结晶作用。在不考虑流体的情况下, 岩浆的结晶作用也可以发生在上升过程中, 这种结晶作用被称为变压结晶作用 (罗照华等, 2013)。变压结晶机制下形成的晶体不同部位代表了不同的压力条件和不同的侵位深度: 晶体核部的压力很可能代表的是深部岩浆房或岩浆通

道中某一深度水平上的压力,而晶体边部的压力则代表了晶体停止生长时所处深度水平的压力(罗照华等,2013;刘小丽等,2015)。本次研究基于角闪石全铝压力计计算结果显示,新寨侵入体中的角闪石从自形→未蚀变半自形/他形,角闪石形成的压力逐渐降低,这与理论上火成岩矿物结晶顺序以及镜下观察结果一致,同时也说明新寨花岗质侵入体在侵位过程中不断有晶体晶出,变压结晶过程中的压力变化是其侵位过程中的主要影响因素,即自形角闪石很可能是在晶体-熔体平衡环境下的结晶产物,其压力可以代表或接近新寨花岗质侵入体在深部岩浆房的结晶条件,而未蚀变半自形/他形角闪石的压力则反映了该岩体在侵位过程中某一深度的结晶条件。基于 Mutch 等(2016)的公式压力计算结果,我们认为新寨岩体侵位深度大于 11.3 km,且岩浆经历了连续的侵位历史,从深部的 >11.3 km 的岩浆房到 7.0~9.5 km 的岩浆房再到浅部地壳就位。

#### 4.1.2 温度

温度是控制碱性侵入岩形成的重要因素之一。在钙碱性侵入岩中,斜长石多数与角闪石共生出现,因此在一定的条件下可以应用到地质温度计中(Holland and Blundy, 1994; Stein and Dietl, 2001)。在角闪石固溶体模式以及野外和实验研究结果的基础上,Holland 和 Blundy(1994)提出了基于浅闪石-透闪石的反应平衡(浅闪石 + 4 石英 = 透闪石 + 钠长石)的地质温度计  $t_A$  (适用于斜长石  $An < 92$  的硅饱和岩体,平衡温度区间为 500~1100℃,误差为  $\pm 40^\circ\text{C}$ )和基于浅闪石-钠透闪石的反应平衡(浅闪石 + 钠长石 = 锰闪石 + 钙长石)的地质温度计  $t_B$  (适用于硅饱和或硅不饱和的岩体)。

本次采集的两件样品岩相学观察结果显示,新寨角闪花岗岩中的自形角闪石与斜长石接触边界平直,未发现反应边、暗化边等结构特征或相互交代的现象(图 2d),说明自形角闪石与斜长石是平衡共生的关系。电子探针成分分析结果也显示共生的自形角闪石和斜长石均未发育成分环带,暗示两者是在一个相对过冷度小、缓慢冷却条件下的结晶产物,因此自形角闪石-斜长石矿物对温度计计算结果能够代表其结晶生长阶段的温压条件。根据 Mutch 等(2016)压力计的估算结果,采用 Holland 和 Blundy(1994)的地质温度计获得新寨花岗岩自形角闪石结晶温度  $t_A$  为 669~726℃,平均 700℃;  $t_B$  为 688~729℃,平均 709℃(表 1)。研究显示,相对于其他岩

浆岩温度计,上述  $t_B$  温度计计算结果更可靠,被更多研究者所认可(Anderson, 1996; Stein and Dietl, 2001; 陆丽娜等, 2011; 李小伟等, 2011; Kiss *et al.*, 2014)。由于岩相学观察到与(交代)半自形/他形角闪石共生的斜长石蚀变较强,因此对于这两类的角闪石未采用角闪石-斜长石温度计计算温度。

基于角闪石中 Si、Fe、Mg、Ti、Na 以及已知压力与角闪石结晶温度之间的相关性,Putirka (2016)提出了一个新的角闪石温度计,误差为  $\pm 30^\circ\text{C}$ ,根据该温度计,获得新寨花岗岩自形角闪石结晶温度  $t_{16}$  为 767~783℃,平均 773℃,未蚀变半自形/他形角闪石结晶温度为 740~764℃,平均 755℃。整体来说,根据 Putirka (2016)提出的角闪石温度计计算出来的自形角闪石结晶温度结果要略高于 Holland 和 Blundy(1994)温度计的结果 40~80℃,但在误差范围内,因此两个温度计结果都是可信的。但考虑到与未蚀变半自形/他形角闪石由于共生的斜长石蚀变比较强,无法用于 Holland 和 Blundy(1994)温度计进行温度估算,本文优先采用 Putirka (2016)提出的角闪石温度计计算出来的结果。

综合角闪石全铝压力计计算结果可以发现,半自形/他形角闪石结晶压力和结晶温度都要比自形角闪石略低,说明其形成阶段要略晚于自形角闪石,这也符合理论上火成岩矿物结晶顺序以及镜下观察结果,但相对压力的变化,温度降低的幅度很小,说明侵入体在上升过程中是近乎等温降压的。

#### 4.1.3 岩浆氧逸度和熔体水含量估算

氧逸度对岩浆演化和岩石成因有重要影响,而角闪石的成分可以用来推断其形成时熔体的氧逸度及水含量(Anderson and Smith, 1995; Ridolfi *et al.*, 2010)。在 Anderson 和 Blundy(1995)的  $Al^{\text{VI}} - Fe^{\text{T}} / (Fe^{\text{T}} + Mg)$  氧逸度图解中可以发现,新寨花岗岩中角闪石指示岩浆结晶具有较高的氧逸度(图 7a)。

Ridolfi 等(2010)则在大量角闪石实验数据基础上,提出了一个根据角闪石分子式计算其结晶时岩浆的氧逸度的计算公式:  $\Delta\text{NNO} = 1.644 \text{ Mg}^* - 4.01$ ,式中,  $\text{Mg}^* = \text{Mg} + \text{Si}/47 - \text{Al}^{\text{VI}}/9 - 1.3 \text{ Ti}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+}/3.7 + \text{Fe}^{2+}/5.2 - \text{Ca}_B/20 - \text{Na}_A/2.8 + \text{K}_A/9.5$ ; Mg 和 Si 为角闪石分子式中 Mg 和 Si 的摩尔分数,  $\text{Al}^{\text{VI}}$ 、 $\text{Ti}^{\text{VI}}$ 、 $\text{Ca}_B$ 、 $\text{Na}_A$  和  $\text{K}_A$  分别为角闪石分子式中相应的阳离子在有关位置上的摩尔分数。根据该公式计算出来的本文角闪石结晶时岩浆的氧逸度结果显示(表 1、图 7b),新寨花岗岩中的自形角闪石结晶

时氧逸度变化范围在  $\Delta\text{NNO} + 0.1 \sim +0.5$  ( $\log f_{\text{O}_2} = -13.5 \sim -12.9$ ), 未蚀变半自形/他形角闪石结晶时氧逸度范围在  $\Delta\text{NNO} + 0.8 \sim +1.5$  ( $\log f_{\text{O}_2} = -13.6 \sim -12.4$ )。这表明角本角闪石结晶时熔体具有较高的氧逸度, 与根据 Anderson 和 Smith (1995) 的  $\text{Fe}^{\text{T}}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{\text{T}}) - \text{Al}^{\text{IV}}$  氧逸度图解得出的结果一致。此外, 如图 7b 所示, 尽管从自形角闪石

到半自形/他形角闪石, 熔体的氧逸度并未发生显著的变化, 但显然半自形/他形角闪石结晶时母岩浆氧逸度变化范围更大 ( $+0.8 < \Delta\text{NNO} < +1.5$ ), 部分角闪石颗粒给出的氧逸度也更低或更高, 这可能是由于新寨花岗岩母岩浆在侵位过程中受到更多、更不均一的地壳物质混染导致的结果。

Ridolfi 等 (2010) 还基于实验中发现角闪石中的

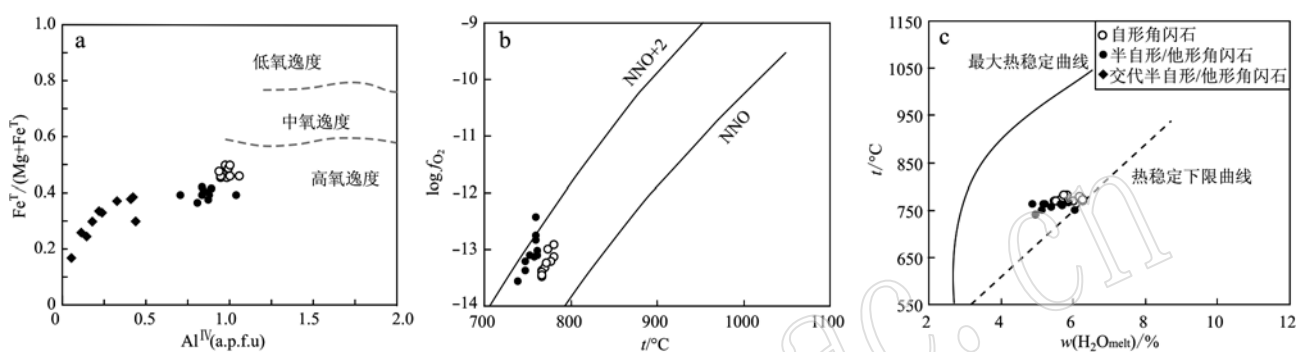


图 7 桂北新寨花岗岩角闪石  $\text{Fe}^{\text{T}}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{\text{T}}) - \text{Al}^{\text{IV}}$  图 (a, 据姜常义等, 1984)、 $\log f_{\text{O}_2} - t$  曲线图 (b, 据 Ridolfi *et al.*, 2010) 和  $t - \text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}$  曲线图 (c, 据 Ridolfi *et al.*, 2010)

Fig. 7  $\text{Fe}^{\text{T}}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{\text{T}}) - \text{Al}^{\text{IV}}$  (a, after Jiang Changyi *et al.*, 1984),  $\log f_{\text{O}_2} - t$  (b, after Ridolfi *et al.*, 2010) and  $t - \text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}$  (c, after Ridolfi *et al.*, 2010) diagrams of amphibole from Xinzhai granite

$\text{Al}^{\text{IV}}$  与含水量在熔融状态中具有明显的相关性, 提出了一个全新的岩浆含水量计算公式:  $\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}} = 5.215 \text{Al}^{\text{IV}*} + 12.28$ , 其中,  $\text{Al}^{\text{IV}*} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{IV}}/13.9 - (\text{Si} + \text{Ti}^{\text{IV}})/5 - \text{Fe}^{2+}/3 - \text{Mg}/1.7 + (\text{Ca}_B + \text{K}_A)/1.2 + \text{Na}_A/2.7 - 1.56 \text{K} - \text{Fe}^{\#}/1.6$ , 其中  $\text{Fe}^{\#} = \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{\text{T}} + \text{Mg} + \text{Mn})$ 。根据此公式本文对岩浆含水量也进行了计算, 结果显示, 新寨花岗岩在地壳深部驻留时平衡熔体具有较高的含水量, 为 4.9% ~ 6.4% (表 1)。正常而言, 矿物的分离结晶会导致熔体中水含量的增高, 但从自形角闪石结晶到半自形/他形角闪石分离结晶, 发现熔体中的水却反而在减少 (图 7c), 这很可能是由于岩浆在侵位的过程中压力持续降低导致的结果。由于水在熔体中的溶解度与压力是呈正相关的关系, 而压力的降低使岩浆中的水达到饱和, 从而导致流体的出溶, 致使熔体中的水含量不升反而降低。相似的情形在其他地区的岩浆结晶过程中也有报道 (段登飞等, 2017)。

#### 4.2 新寨花岗岩角闪石成因及其指示意义

研究显示, 岩浆岩中矿物可能包含多种类型和成因的矿物晶体, 例如: ①完全由寄主岩浆结晶而

来的“自生晶”; ②起源与寄主岩浆同源的岩浆, 但不是从寄主岩浆直接生长出来, 且在进入寄主岩浆前已经循环了一次或者多次而来的“再循环晶”; ③被寄主岩浆捕获的、与该岩浆不同源的“捕虏晶” (Jerram and Martin, 2008; Larrea *et al.*, 2013; Ubide and Kamber, 2018)。

如前所述, 新寨中细粒角闪花岗岩中的角闪石类型主要包括自形角闪石、半自形/他形角闪石和交代半自形/他形角闪石 3 种类型。岩相学观察显示 3 种类型的角闪石皆未发育有溶蚀结构或海绵边结构, 因此非捕虏晶或残留晶; 而 BES 图像和电子探针成分分析结果都显示无论是角闪石还是与之共生的长石都不发育分解环带或震荡环带, 因此也不属于再循环晶 (Jerram and Martin, 2008; Su *et al.*, 2011; 罗照华等, 2013)。换言之, 新寨中细粒角闪花岗岩中的角闪石属于中酸性岩浆在侵位结晶过程中不同阶段所形成的结晶角闪石 (自生晶) 以及成岩作用后期发生交代蚀变的角闪石 (岩浆期后矿物)。在陈光远等 (1987) 提出的  $\text{Fe}^{\text{T}} - \text{Mg} - (\text{Na} + \text{K} + \text{Ca})$  图解 (图 8) 上, 所有的角闪石都落在中酸性成因区内, 所

以角闪石是中酸性原始熔体结晶的产物。此外,我们还注意到新寨花岗岩中的自形角闪石于中下地壳 10.5 ~ 11.3 km、767 ~ 783℃ 的环境下开始结晶,但上升至 7.0 ~ 9.5 km 的深度时岩浆的温度依旧高达 740 ~ 765℃,所以是一个近乎等温降压的过程,这与前文提到的变压结晶是新寨花岗质侵入体主要侵位机制的结论一致。这种从造山带褶皱缩短,逆冲加厚阶段向伸展垮塌阶段转化而形成的快速等温降压过程被认为是诱发华南加里东期大面积中酸性侵入活动的直接因素(程顺波等, 2016)。而新寨岩体正好位于安化-罗城断裂和郴州-临武断裂之间,因此其快速等温降压过程正是通过这两条深大断裂的伸展松弛来实现的。

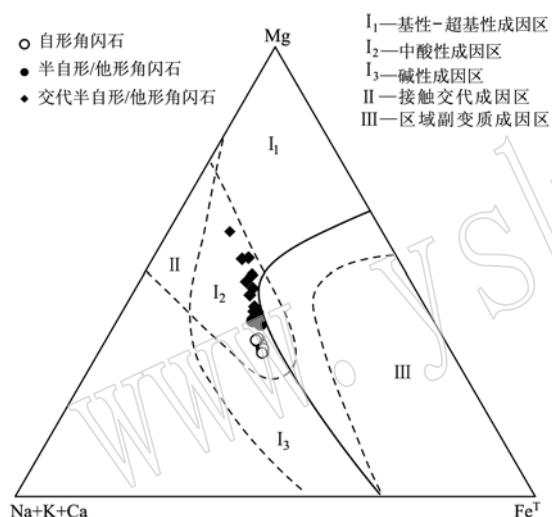
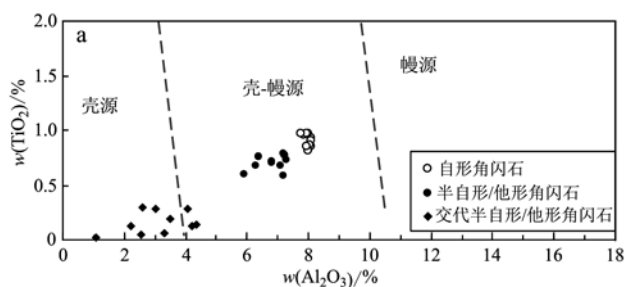


图 8 桂北新寨花岗岩角闪石成因三角图解(据陈光远等, 1987)

Fig. 8 Diagram for the amphibole genesis discrimination (after Chen Guangyuan *et al.*, 1987)



前人研究认为新寨花岗岩可能是变泥质岩部分熔融的产物,但在演化过程中受到了来自地幔的基性岩浆的混合作用影响(贾小辉等, 2017)。在姜常义等(1984)提出的角闪石的  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  的相关性图解(图 9a)上,新寨花岗岩中的自形、未交代半自形/它形角闪石都落在了壳-幔源的范围,而交代的半自形/它形角闪石则主要落在壳源的范围。角闪石矿物化学特征支持新寨花岗岩原始岩浆源遭受过来自地幔的岩浆的混合作用的观点,但岩浆演化过程中角闪石亚类成分和氧逸度的变化规律暗示,新寨花岗岩的原始岩浆在侵位的过程中不断有新的壳源物质加入。在 Ridolfi 和 Renzulli (2012)提出角闪石中的  $K_A - \text{Al}^{\text{IV}}$  相关性图解上,可以发现新寨花岗岩中角闪石尽管相对分散,但都落在了钙碱性岩浆的区域(图 9b),支持前人根据岩石主量成分和里特曼指数得出的新寨花岗岩属于高钾钙碱性花岗岩的观点(贾小辉等, 2017)。

## 5 结论

(1) 新寨中细粒角闪花岗岩中自形角闪石和未蚀变半自形/他形角闪石结晶压力分别为 0.28 ~ 0.30 GPa 和 0.19 ~ 0.26 GPa,显示新寨岩体侵位深度大于 11.3 km;对应的结晶温度分别为 767 ~ 783℃ 和 740 ~ 764℃,暗示侵位过程是一个近乎等温降压的过程,变压结晶作用是新寨侵入体持续侵位过程中的主要结晶方式。

(2) 新寨角闪石结晶时熔体具有较高的氧逸度和含水量,分别为  $\Delta\text{NNO} + 0.1 \sim +0.5$  和 4.9% ~ 6.4%,且在侵位过程中经历了降压流体出溶,熔体

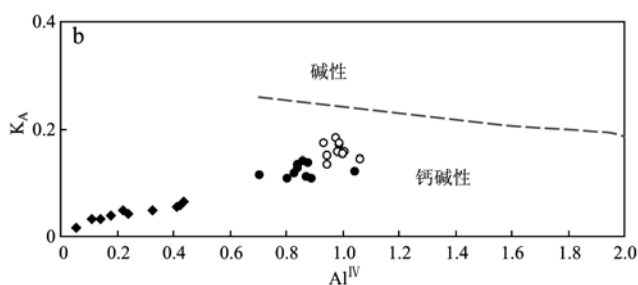


图 9 角闪石  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  图解(a, 底图据姜常义等, 1984)和  $K_A - \text{Al}^{\text{IV}}$  图解(b, 底图据 Molina 等, 2009)

Fig. 9  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  diagram (a, after Jiang Changyi *et al.*, 1984) and  $K_A - \text{Al}^{\text{IV}}$  diagram (b, after Molina *et al.*, 2009) of amphibole

中含水量呈现出不升反降的趋势;角闪石化学组成指示其岩浆属于钙碱性的中酸性岩浆,来源于壳幔混合,且在侵位过程中不断有壳源物质加入。

**致谢** 特别感谢审稿人的宝贵意见和建议以及编辑的热情帮助。电子探针测试工作得到了桂林理工大学谢兰芳老师给予的大力支持,在此表示衷心的感谢。本文得到桂林理工大学博士科研启动基金项目(2014年)资助和广西科技计划项目(桂科AD16450001)的资助。

## References

- Anderson J L. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths[J]. Geological Society of America Special Papers, 315: 125 ~ 138.
- Anderson J L, Barth A P, Wooden J L, *et al.* 2008. Thermometers and thermobarometers in granitic systems[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 69(1): 121 ~ 142.
- Anderson J L and Smith D R. 1995. The effects of temperature and  $f_{O_2}$  on the Al-in-hornblende barometer[J]. American Mineralogist, 80: 549 ~ 559.
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 104(2): 208 ~ 224.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Press, 1 ~ 649(in Chinese).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Ma Liyan, *et al.* 2016. Origin of the Yuechengling Caledonian granitic batholith, northeastern Guangxi: Constraint from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(4): 853 ~ 872(in Chinese with English abstract).
- Dada O. 2014. Application of amphibole chemistry in determining the petrogenesis of hornblende-biotite granites from toro complex, north-central Nigeria[J]. Continental Journal of Earth Sciences, 8(1): 1 ~ 11.
- Droop G T R. 1987. A general equation for estimating  $Fe^{3+}$  concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria[J]. Mineralogical Magazine, 51(3): 431 ~ 435.
- Duan Dengfei and Jiang Shaoyong. 2017. The composition of pyroxene and amphibole in ore-related pluton in Jiguanzui Au-Cu skarn deposit, Edong region: Implication for the magma evolution and mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(11): 3 507 ~ 3 517(in Chinese with English abstract).
- Erdmann S, Martel C, Pichavant M, *et al.* 2014. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: Problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(6): 1 016.
- Hammarstrom J M and Zen E. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. American Mineralogist, 71(11 ~ 12): 1 297 ~ 1 313.
- Holland T J B and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 116(4): 433 ~ 447.
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons[J]. American Mineralogist, 72(3 ~ 4): 231 ~ 239.
- Jerram D A and Martin V M. 2008. Understanding crystal populations and their significance through the magma plumbing system[J]. Geological Society, London, Special Publications, 304(1): 133 ~ 148.
- Jia Xiaohui, Wang Xiaodi and Yang Wenqiang. 2017. Constraints of geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes on the Xinzhai peraluminous granite in northern Guangxi: Implications for petrogenesis and tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 36(5): 738 ~ 749(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1984. On Chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 5(3): 1 ~ 9(in Chinese with English abstract).
- Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks[J]. Geology, 17(9): 837 ~ 841.
- Kiss B, Harangi S, Ntaflou T, *et al.* 2014. Amphibole perspective to unravel pre-eruptive processes and conditions in volcanic plumbing systems beneath intermediate arc volcanoes: A case study from Ciomadul volcano (SE Carpathians)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(3): 1 ~ 27.
- Larrea P, França Z, Lago M, *et al.* 2013. Magmatic processes and the role of antecrysts in the genesis of Corvo Island (Azores Archipelago, Portugal)[J]. Journal of Petrology, 54(4): 769 ~ 793.



- Leake B E. 1971. On Aluminous and Edenitic Hornblendes[J]. Mineralogical Magazine, 38: 389.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names[J]. American Mineralogist, 82(9~10): 1 019 ~ 1 037.
- Li Xiaowei, Huang Xiongfeng and Huang Danfeng. 2011. Review on application of geobarometry for granitic rocks[J]. Geological Journal of China Universities, 17(3): 415 ~ 422 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wartho Jo-Ann *et al.* 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(5~6): 772 ~ 793.
- Liu Xiaoli, Cheng Suhua and Zhang Hongyuan. 2015. Polybaric crystallization of granitic magmas and its dynamic significance: A case from the Fangshan pluton of Beijing[J]. Geoscience, 29(3): 514 ~ 528 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lina, Fan Hongrui, Hu Fangfang, *et al.* 2011. Emplacement depth of the Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China: Evidences from hornblende thermobarometry and fluid inclusions[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(5): 1 521 ~ 1 532 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Yang Zongfeng, Dai Geng, *et al.* 2013. Crystal populations of igneous rocks and their implications in genetic mineralogy [J]. Geology in China, 40(1): 176 ~ 181(in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, *et al.* 2003. Mineral chemistry of amphiboles from granites Related to different mineralization and occurred in two stages of Yanshanian Period in south-middle part of the Daxingan Mountains and its genetic and metallogenic significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 23(1): 5 ~ 10(in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, *et al.* 1994. Magma-dynamics Granitoids: Theory, Methods and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 ~ 260(in Chinese with English abstract).
- Molina J F, Scarrow J H, Montero P G, *et al.* 2009. High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: Evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 158(1): 69 ~ 98.
- Mutch E J F, Blundy J D, Tattitch B C, *et al.* 2016. An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 171(10): 85.
- Putirka K. 2016. Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes[J]. American Mineralogist, 101(4): 841 ~ 858.
- Ridolfi F and Renzulli A. 2012. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: Thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 GPa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163(5): 877 ~ 895.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(1): 45 ~ 66.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(2): 304 ~ 310.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495 ~ 500(in Chinese with English abstract).
- Smith J V and Mackenzie W S. 1958. The Alkali feldspars: IV. The cooling history of high-temperature sodium-rich feldspars[J]. American Mineralogist, 43(9~10): 872 ~ 889.
- Stein E and Dietl C. 2001. Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald[J]. Mineralogy & Petrology, 72(1~3): 185 ~ 207.
- Su Benxun, Zhang Hongfu, Sakya P A, *et al.* 2011. The origin of spongy texture in minerals of mantle xenoliths from the Western Qinling, central China[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 161(3): 465 ~ 482.
- Ubide T and Kamber B S. 2018. Volcanic crystals as time capsules of eruption history[J]. Nature Communications, 9(1): 326.
- Wang Dezi. 2004. The study of granitic rocks in South China: Looking back and forward[J]. Geological Journal of China Universities, 10(3): 305 ~ 314(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2014. The Al-in-hornblende barometry for calc-alkaline igneous rocks: Retrospect, evaluation and applications[J]. Geological Review, 60(4): 839 ~ 850(in Chinese with English abstract).

- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Guowei, *et al.* 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 273 ~ 1 305.
- Wu Huanhuan, Wang Tao, Zhang Zhaochong, *et al.* 2019. Chemical characteristics of amphibole and biotite from the Boziguo'er alkaline granitic pluton in Baicheng County, Xinjiang, and their implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2): 173 ~ 190(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jian, *et al.* 2019. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 625 ~ 638(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangxun and Chen Yangpu. 1993. Study on the time of Xinzhai granite body, Lingchuan County, Guangxi[J]. *Guangxi Geology*, 6(1): 23 ~ 28(in Chinese with English abstract).
- Zhou Ye, Shen Yang, Hou Zengqian, *et al.* 2013. Amphibole, biotite and zircon characteristics of Liuhe orthophyre in western Yunnan and their implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(4): 547 ~ 561(in Chinese with English abstract).
- 李 小 伟, 黄 雄 飞, 黄 丹 峰. 2011. 花岗岩中常用压力计的应用评述[J]. *高校地质学报*, 17(3): 415 ~ 422.
- 刘小丽, 程素华, 张宏远. 2015. 花岗质岩浆的变压结晶作用及其动力学意义: 以北京房山岩体为例[J]. *现代地质*, 29(3): 514 ~ 528.
- 陆丽娜, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 2011. 胶西北郭家岭花岗闪长岩侵位深度: 来自角闪石温压计和流体包裹体的证据[J]. *岩石学报*, 27(5): 1 521 ~ 1 532.
- 罗照华, 杨宗锋, 代耕, 等. 2013. 火成岩的晶体群与成因矿物学展望[J]. *中国地质*, 40(1): 176 ~ 181.
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 2003. 大兴安岭中南段燕山期两类不同成矿花岗岩类角闪石的化学成分及其成岩成矿意义[J]. *矿物岩石*, 23(1): 5 ~ 10.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 ~ 260.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495 ~ 500.
- 唐专红, 李容森. 2003. 桂北新寨复式岩体地质特征及侵位机制初探[A]. 华南青年地学学术研讨会论文集[C]. 134 ~ 140.
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. *高校地质学报*, 10(3): 305 ~ 314.
- 汪 洋. 2014. 钙碱性火成岩的角闪石全铝压力计——回顾、评价和应用实例[J]. *地质论评*, 60(4): 839 ~ 850.
- 吴欢欢, 王 涛, 张招崇, 等. 2019. 新疆拜城县波夜果尔碱性花岗岩体中角闪石与黑云母地球化学特征及其对成岩成矿的记录[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(2): 173 ~ 190.
- 张拴宏, 赵 越, 刘 健, 等. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. *岩石学报*, 23(3): 625 ~ 638.
- 张相训, 陈扬浦. 1993. 灵川县新寨花岗岩体形成时代研究[J]. *广西地质*, 6(1): 23 ~ 28.
- 周 晔, 沈 阳, 侯增谦, 等. 2013. 滇西六合正长斑岩中角闪石、黑云母和锆石的特征及其指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(4): 547 ~ 561.

## 附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1 ~ 649.
- 程顺波, 付建明, 马丽艳, 等. 2016. 桂东北越城岭岩体加里东期成岩作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *大地构造与成矿学*, 40(4): 853 ~ 872.
- 段登飞, 蒋少涌. 2017. 鄂东南矿集区鸡冠嘴矽卡岩型金铜矿床含矿岩体中辉石和角闪石成分变化特征及其对岩浆演化和成矿的指示意义[J]. *岩石学报*, 33(11): 3 507 ~ 3 517.
- 贾小辉, 王晓地, 杨文强. 2017. 桂北新寨强过铝质花岗岩的岩石成因及其构造意义——来自年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素的制约[J]. *地质通报*, 36(5): 738 ~ 749.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, 5(3): 1 ~ 9.