

·花岗岩新思维问题讨论(12)·

“广西型花岗岩”有岩石学意义吗？

——对《广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义》一文的质疑

汪 洋

(中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 对国内外 30 个实例的汇总表明, 所谓“广西型花岗岩”不具备张旗(2014)所认为的岩石学和地球动力学意义。富 Sr 和 Yb 的“广西型花岗岩”在岩性包含了中性岩、酸性岩和过碱性岩, 绝大多数具有负 Eu 异常。从岩石组合(系列)方面看, “广西型花岗岩”是钙碱性系列、碱性系列与 A 型花岗岩的“混杂”。“广西型花岗岩”可以是基性岩浆分离结晶或分离结晶 + 混染(AFC)、壳源岩石部分熔融等多种成岩机制的产物, 斜长石是结晶相或残留相。对同源岩的失水熔融相图的比较分析表明, 花岗岩类的全岩 Sr、Yb 含量不是指示花岗质岩浆起源压力的可靠指标, 张旗提出的以“Sr-Yb”为基础的花岗岩分类没有地球动力学意义。

关键词: “广西型花岗岩”; 岩石成因; 相图; 花岗岩分类

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0427-13

Does the “Guangxi-type granite” have any petrological significance? ——A critique on “Geochemistry of the Guangxi-type granite and its tectonic implications”

WANG Yang

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the compilation of 30 cases around the world, the author holds that the so-called “Guangxi-type granite” does not contain the petrological and geodynamic significance as argued by Zhang Qi (2014), who has proposed the nomenclature. The Sr and Yb enriched “Guangxi-type granites” are composed of intermediate to acid and peralkaline rocks in lithology, and most of them exhibit negative Eu anomalies. From the perspective of rock association (series), the so-called “Guangxi-type granite” is actually the mingling of calc-alkaline, alkaline, and A-type granite. In fact, the “Guangxi-type granite” can be generated by many petrogenetic mechanisms, including the fractional crystallization or assimilated fractional crystallization (AFC) of mafic magma, and the partial melting of crustal sources, with the plagioclase as one of the crystallization or residual phases. The comparison of the phase diagrams from fluid-absent melting of common crustal source rocks shows that the whole-rock Sr and Yb content of granitic rocks cannot be regard as a reliable index to indicate the melting pressure of granitic magma. Accordingly, the “Sr-Yb” classification of granitic rocks proposed by Zhang Qi is useless for geodynamic study.

Key words: “Guangxi-type granite”; petrogenesis; phase diagram; classification of granitoids

收稿日期: 2014-12-22; 修订日期: 2015-01-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652013021)

作者简介: 汪 洋(1969-), 男, 博士, 岩石学专业, E-mail: allen-thalassa@sina.com。

张旗(2014a, 以下简称张文)按照花岗岩类的 Sr、Yb 含量, 将具有富 Sr($\geq 300 \times 10^{-6}$)富 Yb($\geq 2 \times 10^{-6}$)特征的花岗岩类厘定为“广西型花岗岩”, 并探讨了其成因和地球动力学意义。其主要认识是: ①“广西型花岗岩”主要由花岗闪长岩、角闪黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等组成, 属于钾玄岩系列或高钾钙碱性系列; ②“广西型花岗岩”源区残留相主要是角闪石和辉石, 缺少斜长石和石榴子石, 在相图中位于斜长石消失线之上、石榴石出现之前的区域; ③“广西型花岗岩”代表正常厚度或减薄的地壳在很高的温度下形成的花岗岩类。

笔者仔细阅读该文及其参考文献后发现, 张文对于“广西型花岗岩”的岩类学描述存在偏差, 相图的讨论不正确, 岩石成因的论断有失偏颇。本文在全面考察张文所列举的“广西型花岗岩”原始数据出处文献的基础上, 指出“广西型花岗岩”并不具备张文所论述的岩石成因与地球动力学意义。

1 “广西型花岗岩”的岩类学

本文收集了张文所列举的“广西型花岗岩”的原始文献(林景仟等, 1992; 姜耀辉等, 1999; 李献华等, 1999; 段志明等, 2005; 耿全如等, 2005; 高山林等, 2006; 黄俊平等, 2006; 杨永胜等, 2011; 胡升奇等, 2012; 李永飞等, 2012; Askren *et al.*, 1997; Verplanck *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2002; Bogaert *et al.*, 2003; Vander Auwera *et al.*, 2003; Ilbeyli *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; Calzia and Ramo, 2005; Wang *et al.*, 2005; Shellnutt and Zhou, 2007; Mora *et al.*, 2007; Yamamoto, 2007; Yang and Li, 2008; Qin *et al.*, 2009; Brueseke and Hart, 2009; Duchesne *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013)。根据张文提出的“广西型花岗岩”的划分标准($Sr \geq 300 \times 10^{-6}$, $Yb \geq 2 \times 10^{-6}$, $SiO_2 \geq 56\%$)对原始数据进行筛选, 将符合标准的数据所对应的岩类学名称、岩石系列/成因类型、Eu 异常值变化范围及其中位值(median)、成因机制一并列入表 1。其中 Calzia 和 Ramo (2005)仅有一个分析数据符合张文“广西型花岗岩”的标准, 代表性不足, 故而表 1 未列出。喷出岩的岩类学名称采用原始文献依据 TAS 图解的名称, 侵入岩则根据原始文献采用实际矿物含量的定名。需要说明的是, 表 1 中岩石成因分类和成因模式均系原

文作者的认识, 不代表本文作者的意见。

从表 1 可以看出, “广西型花岗岩”在岩类学上包含了从正长岩、二长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、石英正长岩、花岗闪长岩到狭义花岗岩(及其对应的喷出岩)的广泛变化范围, 而非张文所认为的“主要由花岗闪长岩、角闪黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等组成”。也就是说, 除了广义的花岗岩类而外, “广西型花岗岩”还包括了正长岩、二长岩(及其对应的喷出岩)等中性岩类。根据桑隆康等(2012, 第 181 页)的定义, 广义的花岗岩类是指 QAP 三角图(桑隆康等, 2012, 图 4.16)中的 2 ~ 5 区的岩石或者是粒状的石英-长石质的侵入岩, 而正长岩、二长岩等(及其对应的喷出岩)应该归属为碱性系列中性岩类(桑隆康等, 2012, 第 173 ~ 174 页), 后者是否能够如张文那样被称为花岗岩类, 有待商榷。尤其需要注意的是, 作为“广西型花岗岩”“命名地”的钾玄质侵入体, 其岩性主要是正长岩和二长岩(李献华等, 1999, 第 1993 ~ 1994 页), 并非张文所宣称的那样“岩性为石英二长岩和碱长花岗岩”。这些“石英二长岩和碱长花岗岩”在原始文献中是指与中基性钾玄质侵入体伴生的酸性侵入体, 如西山、杨梅、花山、里松等岩体(李献华等, 1999, 第 1994 页第 4 ~ 7 行); 而中性($SiO_2 = 57\% \sim 65\%$)的钾玄质侵入体有半数属于二长岩、正长岩(李献华等, 1999, 图 2)。

在岩石系列或成因类型方面, 从原始文献给出的描述来看, 张文列举的“广西型花岗岩”有 40% 属于 A 型花岗岩类或碱性系列, 其它为钙碱性/高钾钙碱性系列岩石(表 1), 张文将具有不同成因含义的岩套生硬组合在一起, 这是不妥的。在张文所列“广西型花岗岩”典型实例中: ①挪威南部 Lyngdal 岩体是富铁和钾质的 A 型花岗岩类(ferro-potassic A-type granite)(Bogaerts *et al.*, 2003)。②波兰东北部 Mazury 岩套显示准铝质、铁质、钾质与碱钙质的特点(metaluminous, ferroan, potassic and mostly alkali-calcic characters), 属于氧化型 A 型花岗岩类(Duchesne *et al.*, 2010)。③攀西的攀枝花花岗岩与太和花岗岩是高度富铁($Fe^* = 0.92 \sim 0.99$)的过碱性 A 型花岗岩, 卧水正长岩也富铁, $Fe^* = 0.79 \sim 0.81$ (Shellnutt and Zhou, 2007), 它们在 $SiO_2 - Fe^*$ 图解中均属于铁质岩类(Frost *et al.*, 2001; Frost and Frost, 2008, 2011)。需要说明的是, 上述涉及 A 型花岗岩的英文原始文献中, 并没有作者如张旗(2013,

表 1 “广西型花岗岩”实例的岩类学、岩石系列/成因类型、Eu 异常、成因机制
Table 1 The summary of lithology, rock series/ petrogenetic type, Eu anomalies and petrogenetic mechanism of the “Guangxi-type granitoids”

岩体	岩类学名称	岩石系列/成因类型	Eu 异常值范围(中位值)	成因模式	来源文献
桂东南	二长岩、正长岩、石英二长岩	钾玄岩系列	0.34~0.91(0.72)	软流圈地幔和岩石圈地幔岩浆混合的产物	李献华等(1999)
广西大黎	石英二长(斑)岩	壳幔混合源I型花岗岩	0.61~0.90(0.72, 0.74)	幔源基性岩浆底侵使地壳部分熔融	胡升奇等(2012)
西藏冈底斯叶巴组	英安岩	钙碱性系列	0.80~1.07(0.86)	部分熔融作用形成	耿全如等(2005)
攀西攀枝花、太和	过碱性花岗岩	A型花岗岩	0.22~0.98(0.50)	玄武岩浆分离结晶	Shellnutt 和 Zhou(2007)
攀西卧水	正长岩	碱性系列	0.82~1.91(1.36, 1.43)	底侵镁铁质岩浆部分熔融的产物	Shellnutt 和 Zhou(2007)
辽西蓝旗组	安山岩和流纹岩	高钾钙碱性系列	0.62~0.81(0.73)	下地壳部分熔融的产物, 斜长石是残留相	Yang 和 Li(2008)
挪威 Lyngdal 岩体	花岗岩	A型花岗岩	0.48~0.75(0.68)	基性岩浆分离结晶作用的产物	Bogaert 等(2003)
波兰 Mazury 岩套	石英二长闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩	氧化型 A型花岗岩	0.53~0.96(0.70, 0.75)	基性岩浆分离结晶作用的产物	Duchesne 等(2010)
墨西哥 Chiapanecan 火山弧	安山岩和英安岩	钙碱性系列	负 Eu 异常(原文图 16)	俯冲过程相关的火山岩	Mora 等(2007)
西藏唐古拉木乃山岩体	石英二长岩为主、花岗岩	(原文未给出)	0.35~0.88(0.61, 0.62)	壳幔型花岗岩	段志明等(2005)
新疆克拉玛依岩体	石英二长闪长岩、花岗岩、花岗闪长岩	I型花岗岩	0.75~0.96(0.85, 0.86)	下地壳熔融形成	高山林等(2006)
西藏冈底斯中段岩基	石英二长岩、花岗闪长岩	高钾钙碱性系列	0.72~0.84(0.79)	与俯冲消减作用有关的岩浆活动	黄俊平等(2006)
西昆仑大同西岩体	二长岩、石英二长岩、石英正长岩	钾玄岩系列	0.70~0.92(0.83)	(原文未给出)	姜耀辉等(1999)
辽西义县组	粗安岩、粗面岩	高钾钙碱性系列	0.77~0.88(0.87)	加厚下地壳局部熔融产生	李永飞等(2012)
胶辽半岛二长岩	石英二长闪长岩、二长岩、石英二长岩	二长岩系列	负 Eu 异常(原文图 5-15)	分离结晶, 斜长石是分离结晶相	林景仟等(1992)
胶辽半岛甲子山	正长岩	正长岩系列	无 Eu 异常或正异常(原文图 5-4)	源于上地幔	林景仟等(1992)
胶辽半岛柏林川、寨马	霞石正长岩	霞石正长岩系列	无 Eu 异常或正异常(原文图 5-7)	源于上地幔	林景仟等(1992)
内蒙古达布勒勒图岩体	花岗闪长岩、花岗岩	I-S 型过渡花岗岩、S 型花岗岩	0.52~0.91(0.59, 0.84)	花岗闪长岩壳幔混合、花岗岩部分熔融形成	杨永胜等(2011)
美国西部第三纪安山岩	安山岩、粗安岩、英安岩	钙碱性系列	负 Eu 异常(原文图 9)	玄武岩浆分离结晶, 伴随岩浆混合	Askren 等(1997)
美国内华达中新世安山岩	安山岩、粗安岩, 少量英安岩、粗面岩	钙碱性系列-拉斑玄武质系列	0.68~0.95(0.81)	玄武岩浆分离结晶, 伴随地壳混染	Bruescke 和 Hart(2009)
西藏羌塘西部三叠系火山岩	流纹岩、英安岩	钙碱性系列	0.66~0.98(0.71)	(原文未给出)	Fu 等(2010)
广东沿海海基	花岗岩、花岗闪长岩	钙碱性系列, I 型花岗岩	0.55~0.79(0.70, 0.71)	部分熔融	Huang 等(2013)
土耳其 Anatolia 中部	二长岩、石英二长岩、正长岩、石英正长岩	钙碱性系列、碱性系列	0.66~0.85(0.73)	俯冲过程相关, 伴随 AFC 过程	Ilbeyli 等(2004)
华北地台北缘解放营子	花岗闪长岩、花岗岩	高钾钙碱性系列, I 型花岗岩	0.59~0.86(0.68, 0.73)	分离结晶+混染(AFC)过程	Liu 等(2012)
秦岭 Mishuling 岩体	花岗岩	钙碱性系列	0.64~0.83(0.67)	基性下地壳部分熔融	Qin 等(2009)
挪威南部 A 型花岗岩套	花岗岩	A 型花岗岩	0.48~0.99(0.78, 0.79)	基性岩浆分离结晶作用的产物	Vander Auwera 等(2003)
美国西南部 Organ Needle	正长岩、石英正长岩	(原文未提及)	负异常或无异常(原文图 3)	分离结晶, 伴随地壳混染	Verplanck 等(1999)
福建洋坊	碱性正长岩	碱性系列	0.78~0.83(0.82, 0.83)	分离结晶, 斜长石是结晶相	Wang 等(2005)
中蒙边界亚干变质核杂岩	花岗岩	A 型花岗岩	0.53~0.71(0.59)	(原文未给出)	Wang 等(2004)
日本 Numazawa 火山	流纹岩、英安岩	钙碱性	0.94~1.02(0.97)	下地壳部分熔融, 斜长石是残留相	Yamamoto(2007)
攀西新元古代花岗岩	花岗岩	TTG 组合	0.67~0.99(0.95, 0.96)	下地壳部分熔融	Zhou 等(2002)

第270~271页)所批评的那样利用 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解判别花岗岩的成因类型,而且该图解也并非张旗(2013,第271页图4)标注的那样来自 Collins 等(1982),因为后者原文中根本没有“花岗岩的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 判别图”!④前人研究指出,钾玄岩系列组合是与碱性玄武岩系列对应的从玄武质到粗面岩的富钾岩石系列(Joplin, 1968),是一套硅近饱和、富钾与低铁的岩石组合,其以高碱质类似于碱性玄武岩系列,但又以富钾、低铁有别于碱性玄武岩系列,确定钾玄岩系列组合时不能仅依据 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解,还要考察其是否低铁(Morrison, 1980; 徐志刚等, 1999; 焦永玲等, 2013)。李献华等(1999)厘定的桂东南“钾玄质”侵入岩具有富铁特征, $\text{Fe}^* = 0.75 \sim 0.87$, 在 SiO_2-Fe^* 图解中落在铁质岩类区域,应属于钾质碱性岩类而非钾玄岩系列岩石。张文认为上述国外“广西型花岗岩”实例的“ SiO_2 含量偏低, Al_2O_3 含量偏高, REE 分布无明显的负 Eu 异常,离典型的 A 型花岗岩相差甚远”。殊不知,国际学术界对于 A 型花岗岩的定义与张旗研究员的理解(张旗等, 2012; 张旗, 2013)存在重大差异(Bonin, 2007; Frost and Frost, 2011; Dall'Agnol *et al.*, 2012; 仝立华等, 2013; 汪洋等, 2013)。

2 “广西型花岗岩”的成因机制

从表1可以看出,绝大多数(80%)“广西型花岗岩”实例具有明显的负 Eu 异常。这表明在形成“广西型花岗岩”的熔体-矿物体系中存在长石矿物相,即在部分熔融体系中长石是残留相,分离结晶体系中长石是结晶相。这一事实与张文所强调的“广西型花岗岩富 Sr 指示源区残留相缺少斜长石”、“在相图中广西型花岗岩位于斜长石消失线之上、石榴石出现之前的区域”的认识大相径庭。有必要指出,张文列举的“广西型花岗岩”典型实例之一的辽西蓝旗组安山岩和流纹岩均具有负 Eu 异常(Yang and Li, 2008, 图6b),原作者还特意指出蓝旗组安山岩和流纹岩的“负 Sr 和 Eu 异常指示了斜长石是残留相或结晶相(the negative Sr and Eu anomalies suggest plagioclase as a residual or crystallizing phase)”(Yang and Li, 2008, 第109页)。再例如,挪威南部的 Lyngdal 岩体也具有明显的负 Eu 异常(Bogaerts *et al.*, 2003, 表4; 同时见张文的表3)。因此,我们有理由认为,张文关于“广西型花岗岩”残留相缺少斜长石、

源区的温度压力条件在相图中位于斜长石消失线之上、石榴石出现之前区域的认识曲解了原始文献的表述。

在成岩机制方面,原始文献给出的描述表明,“广西型花岗岩”的成岩机制多种多样(表1)。下面我们列举原始文献中对于张文所列“广西型花岗岩”典型实例的成岩机制的阐述。①广西的实例:李献华等(1999)认为广西东南部中生代钾玄质侵入岩“主要起源于与俯冲作用有关的富钾和大离子亲石元素交代地幔”。前人研究表明,富钾火成岩组合的中酸性岩石主要是基性母岩浆经历分离结晶或者 AFC(分离结晶与同化混染)过程的产物(Morrison, 1980; Meen and Curtis, 1989)。②西藏冈底斯叶巴组的英安岩,原作者认为是部分熔融成因,但其立论依据是:在过亲石元素 H(如 Ta、Th、La、Ce 等)和亲石元素 M(如 Zr、Hf、Sm 等)的 H-H/M 图解中,英安岩样品为倾斜排列,说明为部分熔融作用形成(耿全如等, 2005, 第756页左栏第2自然段)。实际上,由于酸性岩浆的微量元素含量演化受副矿物的制约, H-H/M 图解不能用于判别酸性岩浆究竟是通过部分熔融还是分离结晶形成的(参见吴福元等, 2007)。③攀西攀枝花碱性花岗岩与太和碱性花岗岩被认为是峨眉山幔柱玄武岩浆分离结晶的产物(Shellnutt and Zhou, 2007, 第310页,左栏倒数第17~13行);而卧水正长岩被认为是底侵的镁铁质岩浆部分熔融的产物,其具有的 Eu 正异常是源岩富 Eu 或发生过部分熔融的源岩再次熔融的结果(Shellnutt and Zhou, 2007, 第310页,右栏第3自然段)。④辽西蓝旗组安山岩和流纹岩:Yang 和 Li (2008)认为它们是下地壳部分熔融的产物,而斜长石是残留相。这与张文关于“广西型花岗岩”起源的相平衡条件的推测并不一致。⑤墨西哥 Chiapanecan 火山弧中带的安山岩和英安岩是与俯冲过程相关的火山岩(Mora *et al.*, 2007),原作者并未明确描述其成岩机制。现代研究认为,俯冲带的安山岩-英安岩是复杂壳幔相互作用的产物,同时安山岩也可以由玄武质岩浆与流纹质岩浆通过混合作用而形成(桑隆康等, 2012, 第179页),并非如张文所认为的是地壳源岩部分熔融的产物。⑥挪威南部 Lyngdal 岩体中的“广西型花岗岩”被认为是基性岩浆分离结晶作用的产物(Bogaert *et al.*, 2003)。⑦波兰东北部 Mazury 岩套中符合“广西型花岗岩”特征的 Bartoszyce、Filipów 和 Goldap 岩体(注:原始文献中并没

有张文第208页第8行所提及的Boreholes岩体),都是分离结晶的产物(Duchesne *et al.*, 2010, 第955~960页)。尤其需要指出的是,挪威Lyngdal和波兰Mazury都是包含基性岩、中性岩和酸性岩的复式岩体,原文献作者关于分离结晶成因的论证有着充分的野外关系依据(Bogaert *et al.*, 2003; Duchesne *et al.*, 2010),张文将这些岩体中的所谓“广西型花岗岩”单独拿出来的做法割裂了这些岩套内不同岩性之间的有机联系,是不恰当的。笔者认为,在没有像原作者们那样对具体实例进行详细研究或者掌握充分证据的情况下,应当尊重原始文献对于其所研究的岩体成因机制的认识,而不能动辄贬低为“该文应属于垃圾文章了”、“数据都不过硬”(张旗, 2013, 第269页右栏第1和第4自然段)。当然,对同一岩体或岩石,不同的学者可以有不同的认识,需要我们仔细考察、对比不同观点各自的证据以及论证逻辑,从而得出尽可能接近客观实际的结论。那种“不同的学者有不同的认识,很难说哪一种观点是正确的”的说法会导致不可知论。例如,Shellnutt和Zhou (2007)认为攀西太和碱性花岗岩(alkaline granite)是幔源岩浆分离结晶的产物,而Xu等(2008)认为是幔源岩浆导致地壳部分熔融的产物。后者列举的论据有二,其一是碱性花岗岩较与镁铁质层状岩体而言体积比例较大,其二是缺少中性成分岩石(Xu *et al.*, 2008, 第3 099页)。前人研究表明:①玄武质岩浆通过Fe-Ti氧化物矿物的分离结晶可以形成具有Daly间断(Daly gap, 即缺少中性岩)的双峰式岩浆组合,缺少中性成分岩石这一事实不能作为否定碱性花岗质岩浆可以是玄武质岩浆分离结晶产物的论据(Shellnutt *et al.*, 2009; Turner and Rushmer, 2010)。②太和花岗岩含碱性镁铁矿物——铁钠透闪石和霓石,属于过碱性花岗岩。包括狭义的碱性玄武岩在内的相对富Al[即 $ANK = \text{molar Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 1$]的岩石难以通过部分熔融作用形成过碱性花岗质岩浆(参见Bonin, 2007; Frost and Frost, 2011);碱性玄武岩在地壳压力范围内部分熔融的熔体是响岩质的(即 SiO_2 不饱和的碱性岩)(Hay and Wendlandt, 1995),碱性花岗质岩浆是 Al_2O_3 相对于 Na_2O 和 K_2O 不饱和而 SiO_2 过饱和(含石英)的酸性岩。幔源基性岩浆部分熔融形成太和碱性花岗岩的观点与有着坚实物理化学基础的实验岩石学结果之间存在矛盾。③幔源岩浆在地壳深部通过分离结晶机制演化为碱性花岗质岩浆,后

者再上侵就位形成太和花岗岩;太和碱性花岗岩与层状侵入体是在时空分布上相关这一点(Xu *et al.*, 2008, 第3 099页)仅表明两者的伴生关系,不能用两者的体积比例来反证太和碱性花岗岩的分离结晶作用成因。所以,本文作者认为幔源岩浆分离结晶形成太和碱性花岗岩的观点更有道理。综上所述,对于张文所列“广西型花岗岩”的典型实例而言,无论是国内还是国外,对于其成因认识除了地壳源岩部分熔融外,还存在分离结晶或AFC过程等观点。

3 讨论

张文关于“广西型花岗岩”成因及其地球动力学意义的基础是张旗及其合作者近10年来在《岩石学报》、《岩石矿物学杂志》等学术刊物发表的一系列论文以及专著《埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇》(因为篇数甚多,恕不一一列出,在此将其主要观点以“花岗岩新思维”加以统称)。为了有助于将“广西型花岗岩”的问题说清楚,本文对张旗及其合作者的“花岗岩新思维”所阐述的有关花岗质岩浆分类、成因及其地球动力学意义的主要论点评析如下:

作为张文基础的“花岗岩新思维”强调“ SiO_2 小于56%的岩浆岩是幔源, SiO_2 大于56%的岩浆岩是壳源”,花岗岩类($\text{SiO}_2 \geq 56\%$)都是地壳源岩部分熔融的产物(张旗等, 2008, 2010; 张旗, 2014b),其主要依据是:粘度低玄武质岩浆可以发生分离结晶,而粘度高的花岗质岩浆不可能发生分离结晶(张旗等, 2008; 张旗, 2014b)。实际上,国内外没有一本岩石学教科书有这种武断而荒谬的提法(Philpotts and Ague, 2009; 桑隆康等, 2012)。花岗质岩浆是其温度、含水量及所含晶体数量的函数,花岗质岩浆的粘度可以低到与演化的玄武质岩浆相近的程度(这是基性岩浆与酸性岩浆发生混合的前提)(Philpotts and Ague, 2009)。前人研究表明,玄武质岩浆通过分离结晶可以演化为中酸性的长英质岩浆,例如Turner和Rushmer(2010)从野外关系、实验岩石学以及岩相学的角度论证了与地幔柱玄武质岩浆伴生的A型花岗岩主要是基性岩浆分离结晶的产物。再如,Shellnutt等(2009)从地球化学角度论证了玄武质岩浆通过Fe-Ti氧化物矿物的分离结晶可以形成缺少中性岩的双峰式岩浆组合。同时,野外证据和地球化学研究显示,北京昌平薛家石梁-黑山寨杂岩体中的闪长岩、石英二长岩主要是幔源岩浆分离结

晶作用的产物(汪洋, 2014)。除了分离结晶作用, 幔源岩浆与壳源岩石的相互作用(如 AFC 过程)也是形成英质岩浆的重要机制(Kemp *et al.*, 2007; Brown, 2013)。北京西山东岭台组中的粗面岩具有富 Sr 富 Yb“广西型花岗岩”的特点, 其中的富铝钾质粗面岩是幔源岩浆与地壳相互作用的产物(汪洋等, 2009)。因此, 部分熔融作用只是花岗质岩浆的一种形成机制, 花岗质岩浆的成因机制是多种多样的。

作为张文基础的“花岗岩新思维”认为, 花岗岩类的起源压力代表岩浆活动时的地壳厚度(张旗等, 2008, 2010; 张旗, 2013, 2014a, 2014b)。这种论点所隐含的假设是, 花岗岩类源区位于地壳底部, 源区深度(压力)的变化反映了花岗质岩浆形成时地壳厚度的变化。这种认识是片面的。对于由玄武质岩浆分离结晶或者玄武质岩浆与壳源岩石相互作用而形成的花岗质岩浆, 其源区深度取决于玄武质岩浆的侵位深度。对于壳源岩石部分熔融形成的花岗质岩浆而言, 由于发生部分熔融的热源主要来自侵位于地壳之中的玄武质岩浆的结晶潜热(Annen *et al.*, 2006), 其源区深度也取决于玄武质岩浆的侵位深度。对岩浆上侵的物理机制的研究表明, 岩浆从源区分离运移过程中, 决定其在地壳就位的主要因素并非浮力(密度)界面, 而是地壳中的流变学强度变化界面, 其中脆-韧性转换带是决定上侵岩浆驻留就位的重要物理界面(Vigneresse and Clemens, 2000)。对大陆地壳流变学结构的研究表明, 除了 Moho 面而外, 上地壳与中地壳、中地壳与下地壳之间都可以形成流变学强度变化界面(Wang, 2001; Afonso and Ranalli, 2004)。因此玄武质岩浆可以上侵驻留于地壳的不同深度, 进而通过分离结晶或者与围岩相互作用(AFC)或者加热地壳围岩使之部分熔融的方式形成花岗质岩浆。因此, 花岗质岩浆可以形成于下地壳部位, 也可以形成于中地壳深度, 对于由基性岩浆分离结晶形成的花岗质岩浆而言, 其源区可以位于上地壳。这意味着花岗质岩浆的源区深度(压力)与地壳厚度之间不存在简单的因果关系, “花岗岩新思维”利用花岗质岩浆起源压力推测地壳厚度变化这一做法的基础并不牢靠。

作为张文基础的“花岗岩新思维”认为, 花岗岩类的 Sr、HREE(以 Yb 为代表)含量是其起源压力的良好指标, “Sr 和 Yb 是两个比较特殊的元素, 它们主要不是与花岗岩形成的源岩有关, 而是与花岗岩形成时的压力有关”(张旗, 2014b)。这种观点是片

面的。在花岗质岩浆源区的熔体-矿物(残留相或结晶相)体系中, 斜长石的存在与否的确是制约熔体 Sr 含量的重要因素, 然而源岩的 Sr 含量高低也对熔体的 Sr 含量产生影响, 对此 Moyen(2009)、Qian 和 Hermann(2013)均有论述和模拟计算。根据物理化学基本原理, 特定成分体系中的相(phase)组成受制于温度、压力等条件, 给定温压条件时体系中各个相的比例、(固溶体)相的成分则受制于物料的化学成分。如果熔体-矿物体系中斜长石在固相中的比例较低, 而源岩的 Sr 含量很高, 熔体的 Sr 含量仍然可以较高。斜长石固溶体的组分特征也对 Sr 在熔体-矿物体系中的形成产生影响。前人研究表明, 富 Na 斜长石的 Sr 分配系数大于富 Ca 斜长石(Foley, 2008)。由于基性岩浆分离结晶过程中优先结晶富 Ca 斜长石, 所以具有很高 Sr 含量的基性岩浆在相对低压下分离结晶(结晶相不含石榴子石)可以形成具有富 Sr 富 Yb 特征的“广西型花岗岩”。例如: 云南个旧贾沙辉长-二长杂岩体中的二长岩属于张文定义的“广西型花岗岩”(Sr = $795 \times 10^{-6} \sim 1570 \times 10^{-6}$, Yb = $2.41 \times 10^{-6} \sim 3.25 \times 10^{-6}$, 绝大多数 SiO₂ = 56% ~ 60%), 但野外地质、岩相学和地球化学证据表明, 贾沙杂岩体的二长岩是高 Sr 含量(> 2000×10^{-6})基性母岩浆经历分离结晶和地壳同化混染的产物, 分离结晶相为橄榄石 + 辉石 + 斜长石(张颖等, 2014)。所以, “广西型花岗岩”的高 Sr 特征并不能确切指示其起源的熔体-矿物体系中缺少斜长石。

张旗(2014b, 第 791 页)承认大陆基性下地壳的 Sr 含量显著高于 MORB。这意味着当大陆下地壳部分熔融时, 如果残留相中斜长石的比例较低, 与之平衡的熔体的 Sr 含量仍然可以达到埃达克岩的标准(400×10^{-6}), 具体可见 Qian 和 Hermann(2013)的模拟计算结果。这也就是说, 对于壳源花岗岩类而言, Sr 含量不是推测源区是否存在斜长石的确切指标! 另一方面, 许多微量元素(包括 Yb)在花岗质岩浆中的含量取决于副矿物(如磷灰石、锆石、帘石类矿物)的含量(Bea, 1996), 而这些副矿物在熔体中的溶解度是体系强度变量(如温度、氧逸度、H₂O 含量)的函数(Bea, 1996)。因此, 重稀土元素(HREE, 包括 Yb)在花岗质熔体中的含量不仅受制于石榴子石残留相(或结晶相)存在与否, 还受其它物理化学条件的影响。更为重要的是, 如果源岩不是玄武质成分而是泥质岩成分, 那么石榴子石作为残留固相的

起始压力降低为 0.5~0.6 GPa,而不再是 1.0~1.2 GPa(Moyen, 2009)。显然,由玄武质源岩部分熔融形成的花岗质岩浆和由泥质源岩部分熔融形成的花岗质岩浆,即便两者 Yb 含量相同,源区压力也可能很不相同。所以我们认为,所谓“Sr 和 Yb 是两个比较特殊的元素,它们主要不是与花岗岩形成的源岩有关,而是与花岗岩形成时的压力有关”的论述是相当片面的,“花岗岩新思维”仅仅依靠 Sr 和 Yb 的含量来推测花岗质岩浆的起源压力的做法是错误的,得到的诸如地壳厚度变化等推论也不可靠。

张文乃至张旗及其合作者的“花岗岩新思维”系列论文对相图的理解存在很多错误,其中最突出的是,对于花岗质岩浆起源温压条件的推论仅仅依赖于玄武质成分源岩相图(张旗等, 2008; 张旗, 2012, 2014a, 2014b)。对此本文作者以前有过含蓄的批评(汪洋, 2007, 2009)。以 Chappell 和 White (1974)提出 I 型和 S 型花岗岩分类始,学术界认识到花岗质岩浆源自不同成分母岩已有 40 年,仅仅依赖于玄武质成分的相图来讨论花岗质岩浆的起源必定是片面的。物理化学基本原理表明,决定体系相(phase)组成的最主要因素是温度、压力、成分(p - T - X),相同 p - T 条件下不同成分体系的相组成可以显著不同。如前所述, Moyen (2009)基于 273 组基性源岩、136 组“地壳”源岩(指基性岩以外的大陆地壳常见岩性)的实验岩石学结果的总结指出,泥质岩源岩的部分熔融体系中石榴子石稳定压力低至 0.5~0.6 GPa,相当于中地壳深度(约 17~20 km)。仅此一例即可表明,“花岗岩新思维”不厌其烦强调的高 Yb 花岗岩类(所谓“埃达克岩型”和“喜马拉雅型”)起源压力小于 1 GPa、而低 Yb 花岗岩类(所谓“浙闽型”、“南岭型”和“广西型”)起源压力小于 1 GPa 的论述是非常片面的。

张文认为“广西型花岗岩”源区残留相“无斜长石也无石榴石,主要由角闪石±辉石组成”,这是错误的。部分熔融作用形成的花岗质熔体是源岩发生失水熔融(fluid-absent melting 或称 dehydration melting)过程形成的,基性成分源岩失水熔融体系的水分来自源岩中角闪石的结晶水(Clemens, 2005; Moyen and Stevens, 2006)。根据 Moyen 和 Stevens (2006)的总结, MORB 和弧玄武岩成分源岩失水熔融相图中角闪石稳定域始终小于斜长石(图 1),这意味着随着部分熔融程度的增加,源岩的角闪石全部消耗完毕后,残留相仍然含有斜长石。以 MORB 和

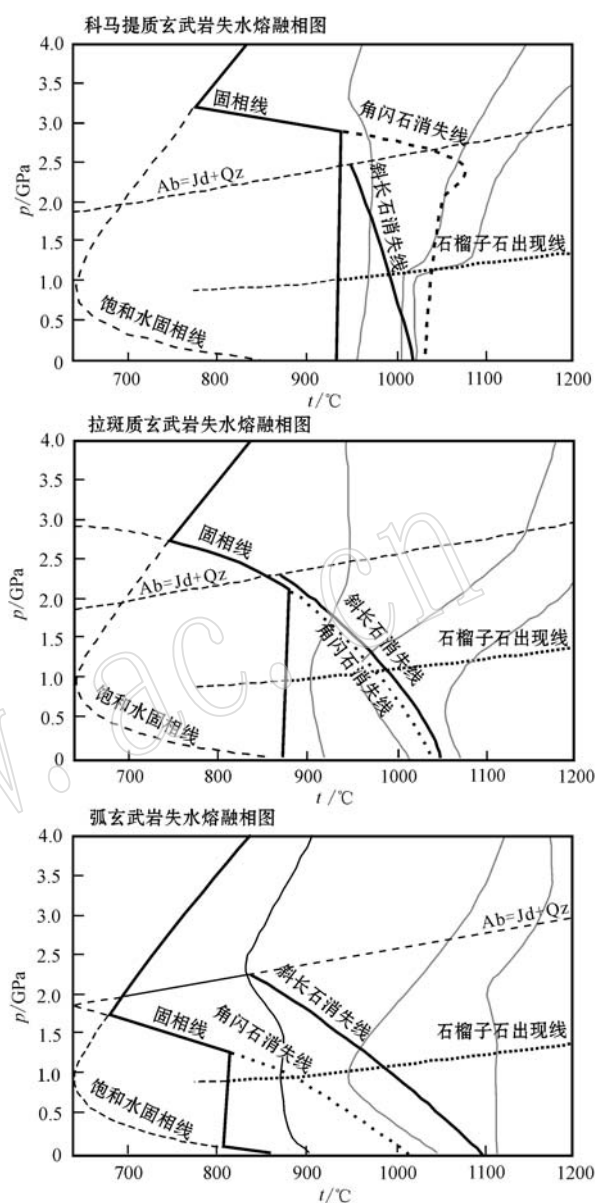


图 1 玄武质岩石失水熔融相图(据 Moyen 和 Stevens, 2006)

Fig. 1 The phase diagrams of basaltic rocks in fluid-absent melting (after Moyen and Stevens, 2006)

Ab—钠长石; Jd—硬玉; Qz—石英; 细曲线代表部分熔融程度,从左至右分别为 10%、30% 和 50%。

Ab—albite; Jd—jadeite; Qz—quartz; The thin lines in diagrams represent the 10%, 30%, and 50% of melt from left to right

弧玄武岩作为源岩的体系,不可能出现残留相由角闪石和辉石组成而又缺失斜长石和石榴子石的情况。大陆下地壳成分近似于弧玄武岩(Rudnick and Gao, 2003; Moyen and Stevens, 2006),不可能形成满足张文猜想的源区残留相“无斜长石也无石榴石,

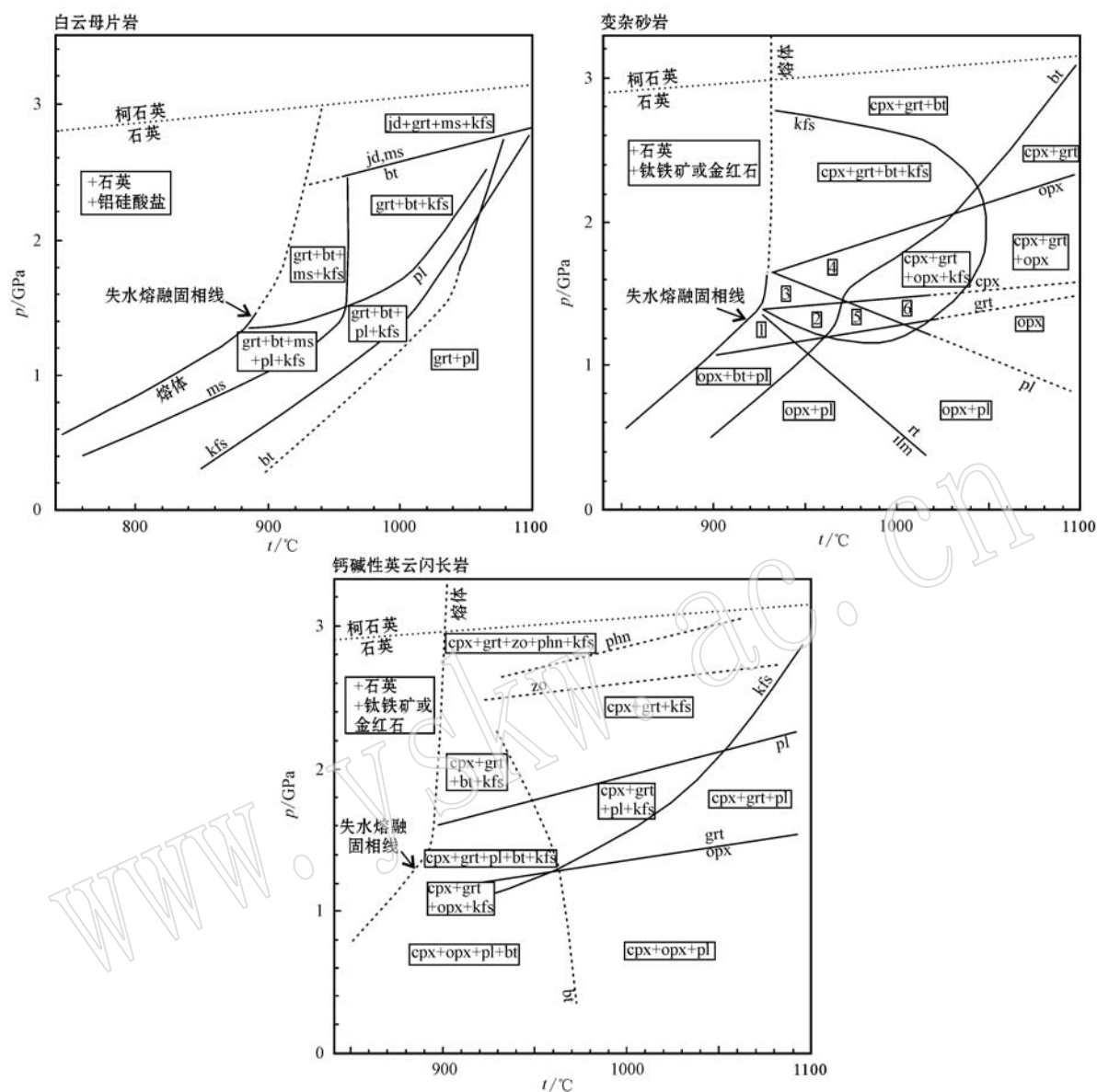


图 2 白云母片岩、变杂砂岩、钙碱性英云闪长岩无水熔融相图(据 Patino Douce 和 McCarthy, 1998)

Fig. 2 The phase diagrams of muscovite schist, meta-greywacke and calc-alkaline tonalite in fluid-absent melting (after Patino Douce and McCarthy, 1998)

bt—黑云母; cpx—单斜辉石; grt—石榴子石; jd—硬玉; kfs—钾长石; ms—白云母; opx—斜方辉石; phn—金云母; pl—斜长石; zo—黝帘石; 1—斜方辉石 + 黑云母 + 斜长石 + 石榴子石; 2—斜方辉石 + 黑云母 + 斜长石 + 石榴子石 + 钾长石; 3—斜方辉石 + 单斜辉石 + 黑云母 + 斜长石 + 石榴子石 + 钾长石; 4—斜方辉石 + 单斜辉石 + 黑云母 + 石榴子石 + 钾长石; 5—斜方辉石 + 斜长石 + 石榴子石 + 钾长石; 6—斜方辉石 + 石榴子石 + 钾长石

bt—biotite; cpx—clinopyroxene; grt—garnet; jd—jadeite; kfs—potassic feldspar; ms—muscovite; opx—orthopyroxene; phn—phengite; pl—plagioclase; zo—zoisite; 1—opx + bt + pl + grt; 2—opx + bt + pl + grt + kfs; 3—opx + cpx + bt + pl + grt + kfs; 4—opx + cpx + bt + grt + kfs; 5—opx + pl + grt + kfs; 6—opx + grt + kfs

主要由角闪石 ± 辉石组成”的“广西型花岗岩”。即便真的存在由角闪石 ± 辉石作为残留相的情况,由于角闪石对于中稀土元素(MREE, Sm~Ho)的分配系数大于轻稀土(La~Nd)和重稀土元素(Er~Lu),

与富角闪石残留相平衡的熔体应该具有 MREE 相对亏损的中部下凹型配分曲线。然而,张文所列举的“广西型花岗岩”实例中并无这种现象,因此其关于“广西型花岗岩”源区残留相的猜想不成立。

张文乃至张旗及其合作者的“花岗岩新思维”系列论文认为,依据“Sr-Yb”分类所厘定的“埃达克岩型”、“喜马拉雅型”、“浙闽型”、“南岭型”和“广西型”花岗岩类主要反映了源区压力的不同,源区成分等其它因素的影响是次要的。Patino Douce 和 McCarthy(1998)发表了可以作为陆壳常见岩石代表的白云母片岩(代表富铝质的泥质岩)、变杂砂岩、钙碱性英云闪长岩的失水熔融实验结果(图2)。从图2可以看出:①白云母片岩的失水熔融主要受白云母与黑云母的分解反应控制,从 $p=0.6$ GPa 起石榴子石就一直是稳定残留相之一,而斜长石消失的最低压力约为 1.4 GPa,最高可达 2.5 GPa;不出现“既无斜长石也无石榴子石”的残留相组合,不可能形成“广西型花岗岩”;“既有斜长石也有石榴子石”残留相组合的压力范围可达 0.6~2.5 GPa,与此对应的所谓“喜马拉雅型花岗岩”可以形成于中地壳(0.6 GPa)到双倍加厚的地壳底部(2 GPa)深度范围。②钙碱性英云闪长岩的失水熔融主要受黑云母分解反应控制,斜长石消失线的压力范围始终位于石榴子石出现线之上,不出现“既无斜长石也无石榴子石”的残留相组合,同样不可能形成张文所谓的“广西型花岗岩”。③变杂砂岩的失水熔融主要受黑云母分解反应控制,石榴子石出现线具有正的 dp/dt 斜率,而斜长石消失线具有负的 dp/dt 斜率,在 $t=1000^{\circ}\text{C}$ 、 $p=1.3$ GPa 到 $t=1050^{\circ}\text{C}$ 、 $p=1.0\sim1.4$ GPa 的范围内残留相“既无斜长石也无石榴子石”,更没有角闪石。理论上,变杂砂岩成分源岩在 $p>1.0$ GPa 的少量加厚的陆壳下部或正常陆壳底部发生部分熔融可以形成富 Sr 富 Yb 的“广西型花岗岩”。同时,出现“有斜长石无石榴子石”的残留相的压力最高可达 1.0~1.3 GPa,意味着“浙闽型花岗岩”和“南岭型花岗岩(即:张旗所认为的 A 型花岗岩)”可以起源于正常陆壳底部或少量加厚的陆壳下部。Litvinovsky 等(2000)采用紫苏花岗岩和淡色花岗岩为起始物料的部分熔融实验结果表明,在 $p=1.5\sim2.5$ GPa 条件下,部分熔融程度低于 30%~40%时,其熔体具有 A 型花岗岩的高 FeO/MgO、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值等成分特征,与 Whalen 等(1987)归纳的 A 型花岗岩相比,这些熔体的 Al_2O_3 偏高约 1% (Litvinovsky *et al.*, 2000, 第 734 页),恰恰同铝质 A 型花岗岩的特征吻合(King *et al.*, 1997; Bonin, 2007; 汪洋, 2008; Frost and Frost, 2011)。同时,部分熔融程度低于 30%~40%时残留相主要是石榴

子石、辉石和三元长石(Litvinovsky *et al.*, 2000, 第 721 页表 2),三元长石中钠长石端员比例高达 56%~72% (Litvinovsky *et al.*, 2000, 第 730 页表 5)。钠长石 Sr 分配系数大(Foley, 2008),与石榴子石和三元长石平衡的熔体应该具有低 Sr 低 Yb 的特点,因此“浙闽型花岗岩”和“南岭型花岗岩”可以起源于加厚陆壳下部。张旗(2013, 第 271 页右栏正数第 12 行)武断地认为“上述作者实验得出的残留物为石榴子石和单斜辉石”,而刻意忽略了三元长石。张旗研究员再一次选择性“失明”!

综合上述,张文及其理论基础——张旗及其合作者的“花岗岩新思维”系列论文对花岗岩类成岩机制的认识不全面,利用花岗岩类的起源压力推断地壳厚度变化的做法缺乏坚实的理论依据,对相图的理解以偏概全,对花岗岩类 Sr、Yb 含量变化的解释有失偏颇。总之,依据“Sr-Yb”分类所厘定的埃达克岩型、喜马拉雅型、浙闽型、南岭型和广西型花岗岩类与源区压力之间不存在确切的一一对应关系,花岗岩类 Sr、Yb 含量是源区温压条件、源岩成分等多种因素综合作用的结果,张旗及其合作者的花岗岩“Sr-Yb”分类不具有明确的地球动力学意义。

4 结论

(1) 张文厘定的“广西型花岗岩”是正长岩、二长岩到花岗闪长岩、狭义花岗岩(及其对应的喷出岩)的集合,而非“主要由花岗闪长岩、角闪黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等组成”。张文的“广西型花岗岩”实例中有 40% 属于 A 型花岗岩类或钾质碱性系列,60% 为钙碱性系列或高钾钙碱性系列,在岩石系列/成因类型方面缺乏内在联系。

(2) “广西型花岗岩”可以是基性岩浆的分离结晶作用产物,也可以由基性岩浆通过 AFC 过程形成,还可能是地壳内基性岩或杂砂岩的部分熔融产物。现有实例表明,在很多“广西型花岗岩”的成岩过程中,斜长石是结晶相或残留相。张文“广西型花岗岩源区残留相缺少斜长石”的论述与实际不符。

(3) 常见壳源岩石部分熔融相图显示, MORB、弧玄武岩、强过铝质泥质岩和钙碱性火成岩的失水部分熔融无法满足张文所猜想的相平衡条件。张文所谓“广西型花岗岩对源岩没有特殊的要求,不论哪种成分的源岩,只要形成的压力较低、温度较高,形成的即可能是广西型花岗岩”的论断并不成立。

(4) 变杂砂岩成分源岩失水部分熔融相图显示,“斜长石消失线之上、石榴子石出现之前的区域”对应于1 000℃、1.3 GPa 和1 050℃、1.0~1.4 GPa 之间的范围。变杂砂岩在 $p > 1.0$ GPa 的少量加厚的陆壳下部或正常陆壳底部发生部分熔融在理论上可以形成具有富 Sr 富 Yb 特征的长英质熔体。“广西型花岗岩”并不具有张文所推测的地球动力学意义。

(5) 张文列举的“广西型花岗岩”在岩类学、岩石成因系列、成岩机制、成岩条件以及地球动力学意义方面并不具有内在的有机联系,没有必要厘定所谓的“广西型花岗岩”。

(6) 张文厘定“广西型花岗岩”的立论依据(花岗岩“Sr-Yb”分类及其相图解释)实证基础薄弱,张旗的花岗岩压力分类及其对应的地球动力学含义缺乏学术价值。

References

- Afonso J C and Ranalli G. 2004. Crustal and mantle strengths in continental lithosphere: is the jelly sandwich model obsolete? [J]. *Tectonophysics*, 394: 221~232.
- Annen C, Blundy J D and Sparks R S J. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones [J]. *Journal of Petrology*, 47: 505~539.
- Askren D R, Roden M F and Whitney J A. 1997. Petrogenesis of Tertiary andesite lava flows interlayered with large-volume felsic ash-flow tuffs of the Western USA [J]. *Journal of Petrology*, 38: 1 021~1 046.
- Bea F. 1996. Residence of REE, Y, TH, and U in granites and crustal protoliths, implications for the chemistry of crustal melts [J]. *Journal of Petrology*, 37: 521~552.
- Bogaerts M, Scaillet B, Liégeois J P, *et al.* 2003. Petrology and geochemistry of the Lyngdal granodiorite (Southern Norway) and the role of fractional crystallisation in the genesis of Proterozoic ferro-potassic A-type granites [J]. *Precambrian Research*, 124: 149~184.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97: 1~29.
- Brown M. 2013. Granite: from genesis to emplacement [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 125: 1 079~1 113.
- Brueseke M E and Hart W K. 2009. Intermediate composition magma production in an intracontinental setting: Unusual andesites and dacites of the mid-Miocene Santa Rosa-Calico volcanic field, Northern Nevada [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188: 197~213.
- Calzia J P and Ramo O T. 2005. Miocene rapakivi granites in the southern Death Valley region, California, USA [J]. *Earth-Science Reviews*, 73: 221~243.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Clemens J D. 2005. Melting of the continental crust: fluid regimes, melting reactions and source-rock fertility [A]. Brown M and Rushmer T. *Evolution and Differentiation of the Continental Crust* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 297~331.
- Collins W J, Beams D, White J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Dall'Agnol R, Frost C D and Rämö O T. 2012. IGCP Project 510 "A-type Granites and Related Rocks through Time": Project vita, results, and contribution to granite research [J]. *Lithos*, 151: 1~16.
- Duan Zhiming, Li Yong, Zhang Yi, *et al.* 2005. Zircon U-Pb Age, continent dynamics significance and geochemical characteristics of the Mesozoic and Cenozoic granites from the Tanggula range in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 79(1): 88~97 (in Chinese with English abstract).
- Duchesne J C, Martin H, Baginski B, *et al.* 2010. The origin of ferroan-potassic A-type granites: The case of the hornblende-biotite granite suite of the Mesoproterozoic Mazury complex, northeastern Poland [J]. *The Canadian Mineralogist*, 48: 947~968.
- Foley S. 2008. A trace element perspective on Archean crust formation and on the presence or absence of Archean subduction [A]. Condie K C and Pease V. *When did Plate Tectonics Begin on Planet Earth?* [C]. *Geological Society of America Special Papers*, No. 440: 311~50.
- Frost B R, Arculus R J, Barnes C G, *et al.* 2001. A geochemical classification of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 033~2 048.
- Frost B R and Frost C D. 2008. A geochemical classification for felsic pathic igneous rocks [J]. *Journal of Petrology*, 49: 1 955~1 969.
- Frost C D and Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin [J]. *Journal of Petrology*, 52: 39~55.
- Fu X G, Wang J, Tan F W, *et al.* 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 17: 135~144.
- Gao Shanlin, He Zhiliang and Zhou Zuyi. 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in west Junggar, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 24: 125~130 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Pan Guitang, Jin Zhenmin, *et al.* 2005. Geochemistry and genesis of the Yeba volcanic rocks in the Gangdise magmatic

- arc, Tibet[J]. *Earth Science*, 30(6): 747~760(in Chinese with English abstract).
- Hay D E and Wendlandt R F. 1995. The origin of Kenya rift plateau-type flood phonolites: Results of high-pressure/high-temperature experiments in the systems phonolite-H₂O and phonolite-H₂O-CO₂[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 401~410.
- Hu Shengqi, Zhou Guofa, Peng Songbo, *et al.* 2012. Chronology and geochemical characteristics of quartz monzonite (porphyry) in the Dali copper-molybdenum deposit and its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 23~37(in Chinese with English abstract).
- Huang H Q, Li X H, Li Z X, *et al.* 2013. Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 280~302.
- Huang Junping, Cao Shenghua, Chen Zhenhua, *et al.* 2006. Geological characteristics and tectonic significance for late Jurassic-early Cretaceous granite in middle Gangdise, Tibet[J]. *Resources Survey and Environment*, 27(4): 277~285(in Chinese with English abstract).
- Ilbeyli N, Pearce J A, Thirlwall M F, *et al.* 2004. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey[J]. *Lithos*, 72: 163~182.
- Jiang Yaohui, Guo Kunyi, He Jurui, *et al.* 1999. Geochemistry and rock series of quartz monzonite intrusion in west-side of Datong on Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Geochimica*, 28: 542~550(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yongling and Wang Yang. 2013. How to identify the shoshonite association[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(sup.): 176~177(in Chinese).
- Joplin G A. 1968. The shoshonite association: A review[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 15(2): 275~294.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, *et al.* 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon[J]. *Science*, 315: 980~983.
- King P L, White A J and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granite of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, *et al.* 1999. The Shoshonitic intrusive belt of SE Guangxi and its petrological and geochemical characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(18): 1992~1998(in Chinese with English abstract).
- Li Yongfei, Li Zhitong, Yang Fanglin, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and geological implication of the acidic-intermediate dyke and lava of the major cycle of Yixian Formation[J]. *Geology and Resources*, 21(1): 42~50(in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Chi Xiaoguo, *et al.* 1992. Mesozoic Granite in Jiao-Liao Peninsula[M]. Beijing: Sci. Publ. House, 1~208(in Chinese).
- Litvinovsky B A, Steele I M and Wickham S M. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 41(5): 717~737.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, *et al.* 2012. Petrogenesis of middle Triassic post-collisional granite from Jiefangyingzi area, southeast Inner Mongolia: Constraint on the Triassic tectonic evolution of the north margin of the Sino-Korean paleoplate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 147~159.
- Meen J K, Curtis P C. 1989. What are Shoshonites? [J]. *EOS—Transactions of American Geophysical Union*, 70: 1421.
- Mora J C, Jaimes-Viera M C, Garduño-Monroy V H, *et al.* 2007. Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan Volcanic Arc (Central Area), Chiapas Mexico[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 162: 43~72.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13: 97~108.
- Moyen J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the “adakitic signature”[J]. *Lithos*, 112: 556~574.
- Moyen J F and Stevens G. 2006. Experimental Constraints on TTG Petrogenesis: Implications for Archean Geodynamics[A]. Benn K, Mareschal J C and Condie K C. *Archean Geodynamics and Environments*[C]. AGU Geophysical Monograph Series, 164: 149~175.
- Patino Douce A E and McCarthy T C. 1998. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction[A]. Hacker B R and Liou J G. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*[C]. Kluwer Academic Publishers, 27~55.
- Philpotts A and Ague J. 2009. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology (2nd Edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1~686.
- Qian Q and Hermann J. 2013. Partial melting of lower crust at 10-15 kbar: constraints on adakite and TTG formation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 1195~1224.
- Qin J F, Lai S C, Grapes R, *et al.* 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China)[J]. *Lithos*, 112: 259~276.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. The composition of the continental crust [A]. Rudnick R L. *The Crust - Treatise on Geochemistry Volume 3*[C]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 1~64.
- Sang Longkang and Ma Changqian. 2012. Petrology (2nd Edition)

- [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~620(in Chinese).
- Shellnutt J G and Zhou M F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume[J]. *Chemical Geology*, 243: 286~316.
- Shellnutt J G, Zhou M F and Zellmer G F. 2009. The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap: An example from the Permian Baima igneous complex, SW China[J]. *Chemical Geology*, 259: 204~217.
- Tong Lihua and Wang Yang. 2013. Ferroan granitoids: definition, classification and models of origin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(3): 370~378(in Chinese with English abstract).
- Turner S and Rushmer T. 2010. Similarities between mantle-derived A-type granites and voluminous rhyolites in continental flood basalt provinces[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth and Environmental Science*, 100: 51~60.
- Vander Auwera J, Bogaerts M, Liégeois J P, *et al.* 2003. Derivation of the 1.0~0.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas[J]. *Precambrian Research*, 124: 107~148.
- Verplanck P L, Farmer G L, McCurry M, *et al.* 1999. The chemical and isotopic differentiation of an epizonal magma body: Organ Needle pluton, New Mexico[J]. *Journal of Petrology*, 40: 653~678.
- Vigneresse J L and Clemens J D. 2000. Granitic magma ascent and emplacement: neither diapirism nor neutral buoyancy[A]. Vendeville B, Mart Y and Vigneresse J L. Salt, Shale and Igneous Diapirs in and around Europe[C]. Geological Society, London, Special Publications, 174: 1~19.
- Wang Q, Li J W, Jian P, *et al.* 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian-Triassic transtension[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 339~354.
- Wang T, Zheng Y D, Li T B, *et al.* 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 715~729.
- Wang Y. 2001. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: constraints on active deformation[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126: 121~146.
- Wang Yang. 2007. A Discussion on the Problems of the Igneous Petrology Education in Chinese Universities: An insight from some recent petrology textbooks by foreign authors[J]. *Chinese Geological Education*, 16(4): 150~153(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2008. Petrogenesis of the Jurassic aluminous A-type granites in the Nanling area, South China and its constraint on paleo-geotherm[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 365~381(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2009. Book review on "Adakite and Granite: Challenge and Opportunity"[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 232(in Chinese).
- Wang Yang. 2014. Magmatic response to the orogenic collapse: An example from the Xuejiashiliang-Heishanzhai magmatic complex in Beijing[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 656~669(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Ji Guangyi, Sun Shanping, *et al.* 2009. Origin of the volcanic rocks in the Donglingtai Formation from Yanhecheng area, Western Hills of Beijing and its geological implications[J]. *Geological Review*, 55(2): 191~214(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Jiao Yongling, Tong Lihua, *et al.* 2013. The essence of A-type granitoids: A discussion on the opinions held by Prof. Zhang Qi and some other researchers[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 260~266(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. On some problems in the genetic research of granitoid[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 3084~3104.
- Xu Zhigang, Sheng Jifu and Sun Shanping. 1999. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems[J]. *Geological Review*, 45(sup.): 43~62(in Chinese with English abstract).
- Yamamoto T. 2007. A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 119~133.
- Yang W and Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton[J]. *Lithos*, 102: 88~117.
- Yang Yongsheng, Sun Bonian, Kang Hongjie, *et al.* 2011. Major and trace element geochemical characteristics and petrogenesis of Dabuxiletu pluton in the north part of Sonid Left Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 38(2): 301~316(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for A-type granite: what is the essence?"[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 267~274(in Chinese with English abstract).

- Zhang Qi. 2014a. Geochemistry of the Guangxi-type granite and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 199~210(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2014b. Geodynamic implications of continental granites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 785~798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985~1015(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran Hao and Li Chengdong. 2012. A-type granite: what is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621~626(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 1~344(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying, Huang Zhilong, Luo Taiyi, *et al.* 2014. The geochemistry and SIMS U-Pb zircon dating of the Jiasha gabbro-monzonitic intrusion in Gejiu district, Yunnan Province[J]. *Geochimica*, 42(6): 523~543(in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51~67.
- 段志明, 李 勇, 张 毅, 等. 2005. 青藏高原唐古拉山中新世代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大陆动力学意义[J]. *地质学报*, 79(1): 88~97.
- 高山林, 何治亮, 周祖翼. 2006. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义[J]. *新疆地质*, 24: 125~130.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因[J]. *地球科学*, 30(6): 747~760.
- 胡升奇, 周国发, 彭松柏, 等. 2012. 广西大黎铜钼石英二长(斑)岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地球学报*, 33(1): 23~37.
- 黄俊平, 曹圣华, 陈振华, 等. 2006. 西藏冈底斯中段晚侏罗一早白垩世花岗岩特征[J]. *资源调查与环境*, 27(4): 277~285.
- 姜耀辉, 郭坤一, 贺菊瑞, 等. 1999. 青藏高原大同西侧石英二长岩体地球化学及岩石系列[J]. *地球化学*, 28: 542~550.
- 焦永玲, 汪 洋. 2013. 如何鉴别钾玄岩(橄榄安粗岩)组合[J]. *高校地质学报*, 19(sup.): 176~177.
- 李献华, 周汉文, 刘 颖, 等. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征[J]. *科学通报*, 44: 1992~1998.
- 李永飞, 李之彤, 杨芳林, 等. 2012. 义县组中期中酸性岩墙与熔岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与资源*, 21(1): 42~50.
- 林景仟, 谭东娟, 迟效国, 等. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩[M]. 北京: 科学出版社, 1~208.
- 桑隆康, 马昌前. 2012. 岩石学(第2版)[M]. 北京: 地质出版社, 1~620.
- 全立华, 汪 洋. 2013. 铁质花岗岩: 定义、分类及成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(3): 370~378.
- 汪 洋. 2007. 从教材看当前我国火成岩石学教学的某些不足[J]. *中国地质教育*, 16(4): 150~153.
- 汪 洋. 2008. 再论南岭侏罗纪“铝质”A型花岗岩的成因及其对古地温线的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 32(3): 365~381.
- 汪 洋. 2009. 评《埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇》[J]. *岩石学报*, 25(1): 232.
- 汪 洋. 2014. 造山崩塌过程的岩浆作用响应: 以北京薛家石梁—黑山寨岩浆杂岩体为例[J]. *大地构造与成矿学*, 38(3): 656~669.
- 汪 洋, 姬广义, 孙善平, 等. 2009. 北京西山沿河城东岭台组火山岩成因及其地质意义[J]. *地质论评*, 55(2): 191~214.
- 汪 洋, 焦永玲, 全立华, 等. 2013. 再论A型花岗岩的实质——与张旗先生等商榷[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 260~266.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217~1238.
- 徐志刚, 盛继福, 孙善平. 1999. 关于“橄辉玄粗岩系列(组合)特征及某些问题的讨论”[J]. *地质论评*, 45(sup.): 43~62.
- 杨永胜, 孙柏年, 康鸿杰, 等. 2011. 内蒙古苏尼特左旗北达布锡勒图岩体主微量元素地球化学特征及成因探讨[J]. *中国地质*, 38(2): 301~316.
- 张 旗. 2013. A型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A型花岗岩的实质是什么”的质疑[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 267~274.
- 张 旗. 2014a. 广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(1): 199~210.
- 张 旗. 2014b. 大陆花岗岩的地球动力学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(4): 785~798.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类——标志[J]. *岩石学报*, 26(4): 985~1015.
- 张 旗, 冉 隲, 李承东. 2012. A型花岗岩的实质是什么? [J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621~626.
- 张 旗, 王 焰, 熊小林, 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 1~344.
- 张 颖, 黄智龙, 罗泰义, 等. 2014. 云南个旧西区贾沙辉长-二长岩体 SIMS 锆石 U-Pb 定年及地球化学研究[J]. *地球化学*, 42(6): 523~543.

附中文参考文献