

铁质花岗岩:定义、分类及成因

仝立华^{1,2}, 汪 洋¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100029

摘 要:从 1979 年提出“A 型花岗岩”至今的 30 余年中, A 型花岗岩被越来越多的学者认识并接受。但随对其研究的不断深入, A 型花岗岩这个词被应用得太过广泛, 以至于人们对它的认识变得越来模糊不清。Frost 等人根据铁镁指数指出“A 型花岗岩”是铁质的花岗岩, 并基于铝饱和指数、碱度指数以及修正的 Peacock 碱钙指数将铁质花岗岩类划分为过碱质、过铝质和准铝质 3 个成分组和 8 个亚类。铁质花岗岩的厘定并不需要微量元素和同位素地球化学依据, 作为描述性的术语, “铁质花岗岩”名称本身不具有特定的岩石成因意义。但是, 铁质花岗岩的主要岩石化学特点与其成因机制之间具有隐含的密切联系。不同的成岩过程演化出多样的铁质花岗岩, 某种程度上, 此分类方案深刻地反映了铁质花岗岩多样性的本质。

关 键 词:A 型花岗岩; 铁质花岗岩; 花岗岩分类; 岩石成因

中图分类号:P588.12⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2013)03-0370-09

Ferroan Granitoids: Definition, Classification and Origination

TONG Li-hua^{1,2}, WANG Yang¹

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China

Abstract: It has been more than 30 years since the term “A-type granite” was defined in 1979, more and more granites were referred to as A-type granite. However, the term “A-type granite” has become more confusing than edifying because it has been applied to a broad spectrum of granitoid compositions with varying petrogenesis. Frost et al. and Frost et al. defined that A-type granitoids are ferroan granitoids as their distinguished Fe-index (Fe^*) values in the Fe^* vs. SiO_2 diagram. The ferroan granitoids are subdivided into 3 groups according to the aluminum saturation index and the alkalinity index that including peralkaline, metaluminous and peraluminous granitoids, and categorized into 8 subclasses further on the basis of the modified alkali-lime index. Importantly, the concept of ferroan granitoid is non-genetic, thus the evidences of trace elements or isotopes are needless essentially for its definition. However, the major elements characteristics of the ferroan granitoids are significantly influenced by petrogenetic processes. As a result, the ferroan granitoids can originate from distinct petrogenetic processes. In this sense, the new classification proposed by Frost et al. reveals the essence of the variety of ferroan (A-type) granitoids.

Key words: A-type granite; ferroan granitoid; granite classification; petrogenesis

1979 年 Loiselle 和 Wones 提出“A 型花岗岩”这一术语的摘要^[1]与 Chappell 和 White 关于 I、S 型花岗岩分类的摘要^[2]是自 1958 年以来在花岗岩研究中关注度最高的两篇文献^[3~5]。A 型花岗岩这一概念被视为是花岗岩成因研究中的一个重大贡献^[3], 它的提出使人们认识到一种之前未被充分重视的、形成于板内环境的富铁花岗岩系列。在随后的 30 余年里, 国内外众多学者对 A 型花岗岩进行

了研究^[3, 6~11]。在系统地总结前人的大量研究的基础上, 根据 A 型花岗岩类岩石富铁的特征, 学者们提出“铁质花岗岩”这一新概念^[4, 5], 并基于常量元素特征对“铁质花岗岩”进行了进一步分类, 已获得国内外花岗岩研究者的广泛认同, 目前在国际顶级学术刊物(如: Journal of Petrology, Contributions to Mineralogy and Petrology, Lithos, Precambrian Geology, Geosphere 等)中已被引用 430 余次(据

收稿日期: 2012-05-17 收到, 06-29 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572128, 40376013, 40104003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010ZD15)

第一作者简介: 仝立华(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩石学. E-mail: tuzitonglihua@sina.com.

通讯作者: 汪洋(1969—), 男, 研究方向: 岩石学. E-mail: allen_thalassa@sina.com.

Web Of Science 检索),其中有代表性的部分文献列于文后^[12~15]。本文重点介绍铁质花岗岩的定义、分类及其成岩模式,除特别注明者外,本文中花岗岩一词指广义的花岗岩类(即:granitoid 或 granite(s. l.))。

1 从 A 型花岗岩到铁质花岗岩

1.1 A 型花岗岩概念的演变

A 型花岗岩原意指那些由碱性(alkaline)玄武质母岩浆演化形成的贫水低氧逸度的花岗岩,它们形成于非造山(anorogenic)环境,在化学成分上具有无水(anhydrous)、适度碱性(mildly alkaline)、高 Fe/(Fe + Mg)比值、高 K₂O 含量和 K₂O/Na₂O 比值、不相容元素(除 Eu 外的 REE、Nb、Ta、Zr)含量高而相容元素(Ni、Cr、Ba、Sr、Eu 等)含量低的特征^[1]。在 20 世纪 80~90 年代,越来越多的花岗质岩石被归属于 A 型花岗岩。例如,某些过铝质的二云母矽线石花岗岩、黄玉流纹岩^[16, 17],层状杂岩体(layered igneous complex)中的花斑岩^[18],环斑花岗岩^[19, 20]以及一些黑云母花岗岩^[21]。随着 A 型花岗岩这一概念外延的不断扩大,其岩相学、矿物学、地球化学以及大地构造背景等表现出多样化的特征^[3],某种程度上可以说目前 A 型花岗岩的涵盖范围已经包括了除典型的 S 型和 I 型以外的所有花岗岩类岩石^[22, 23]。

虽然 A 型花岗岩一词得到广泛应用,对 A 型花岗岩的确切定义却越来越含糊,以至于有学者认为

A 型花岗岩是模糊不清的花岗岩类 Ambiguous Granitoid^[24]。国内曾有学者建议用“碱性花岗岩”(alkaline granite)一词代替 A 型花岗岩^[25],但是国际地科联火成岩分类学分委会不推荐使用这一术语,分委会认为该名词的含义等同于更准确的术语“peralkaline granite(过碱质花岗岩)”,即岩石中 Na₂O + K₂O 的分子数超过 Al₂O₃ 的分子数的花岗岩^[26]。目前很多被归属于 A 型花岗岩的花岗岩类并不显示过碱质的化学特征,“碱性花岗岩”并不等同于 A 型花岗岩。同时,随着 A 型花岗岩概念外延的不断扩大,对于 A 型花岗岩成因的解释越来越多,据统计国内外学提出的成因模式不下 9 种^[23]。有学者明确指出,A 型花岗岩这一概念并非基于特定的岩石成因机制,而是反映了这类花岗岩的岩石化学特征,所以 A 型花岗岩与 I、S、M 型花岗岩不同,不属于“花岗岩成因分类”体系^[3, 8]。基于此认识,Bonin 总结了 A 型花岗岩各方面的特点(表 1)^[3, 27]。从表 1 可以看出,A 型花岗岩的岩石学、矿物学和地球化学成分的变化范围相当大。因此,对 A 型花岗岩的厘定不可避免地会出现歧义。

1.2 铁质花岗岩的定义

Frost 等人^[4, 5]基于全球典型 A 型花岗岩的岩石学和地球化学特征,首次明确提出:与其它花岗岩类相比,铁相对于镁的富集是 A 型花岗岩最基本的化学特征,其成分点落在 Frost 等^[5]厘定的 SiO₂-Fe* 图解中的铁质花岗岩区域(图 1),故称其为铁质

表 1 A 型花岗岩主要特征表^[3, 27]

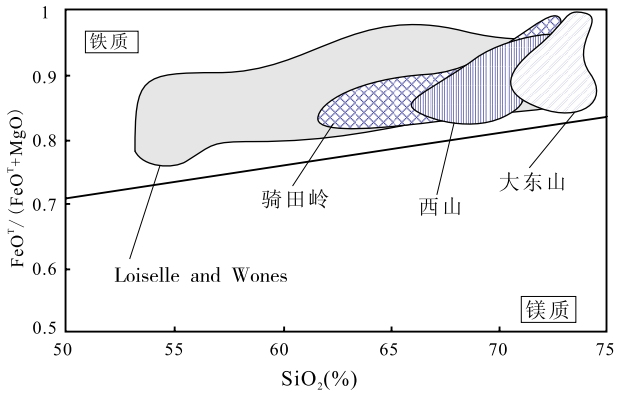
Table 1 Major features of A-type granite igneous suites

A 型花岗岩		二长花岗岩-正长花岗岩-碱长花岗岩	
伴生岩石 (IUGS 命名)		斜长岩-辉长岩-闪长岩 二长辉长岩-二长闪长岩-二长岩 正长岩-碱性长石正长岩-霞石正长岩	
造岩矿物	长石组合	石英 伴生的硅不饱和和岩石中的似长石 超熔线型长石 亚熔线型长石 过渡熔线型(transsolvus)长石	紫色-茶色-黑色的自形 β-石英 他形晶体 中条纹长石,伴有两相碱性长石(钾长石和钠长石) 钾长石和斜长石(An < 15) 具有钾长石边的中条纹长石,伴有钾长石与钠长石
	基性矿物组合	液相线组合 岩浆后期结晶的钙质闪石特征 近固相线/固相线下的钠钙闪石-钠铁闪石特征 近固相线/固相线下的云母组合	铁橄榄石 + 辉石 + 铁氧化物 绿钙闪石-铁浅闪石-铁角闪石 冻蓝闪石-蓝透闪石-钠透闪石-钠铁闪石-钠闪石-铁闪石 铁云母-铁叶云母;铁锂云母-锂白云母,芒云母;绿磷石质白云母;粘土矿物
	副矿物	钛铁氧化物 硅酸盐 磷酸盐(含量低或很低) 含“高科技金属”的金属矿物 金属矿物 其它矿物	钛铁矿-铁钛尖晶石-磁铁矿 锆石-钍石-纤硅锆钠石-褐帘石-硅钛铁锆矿-三斜闪石-黄玉土柁石土电气石土石榴子石 磷灰石-独居石-磷钇矿 褐钇锡矿-复稀金矿-钼钇石-烧绿石-锗日光榴石 锡石-辉钼矿-黑钨矿-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿±磁黄铁矿-黄铜矿-砷铅矿等 萤石-含稀土的氟化物±碳酸盐

续表 1

地球 化学		$\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) > 0.446 + 0.0046 \times \text{SiO}_2$ 或 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) > 0.486 + 0.0046 \times \text{SiO}_2$	铁质 A 型	
		对于低的 Ga/Al 比值 以及低的 (Zr + Nb + Ce + Y) 含量而言:	$\text{FeO}^T/\text{MgO} > 16$ $4 < \text{FeO}^T/\text{MgO} < 16$ $\text{FeO}^T/\text{MgO} < 4$	A 型花岗岩 分异的 (I、S 型) 花岗岩 未分异的 (I、S 型) 花岗岩
		ASI < 1		过铝质
		NK/A < 1		准铝质
		NK/A > 1		过碱质
		对于任何 ASI 值的岩石: NK/A > 0.85 或 NK/A > 0.88		碱性或 A 型岩套
			Y + Nb > 50 - 55 ppm Yb + Ta > 6 ppm	板内花岗岩 (WPG) 和洋中脊花岗岩 (ORG)
	痕迹元素 判别		$10000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \text{ ppm}$	A 型花岗岩
			Y/Nb < 1.2 Y/Nb > 1.2	A1 亚类, 板内裂谷 A2 亚类, 后碰撞
			准铝质和过碱质岩石中含量高 含黄玉的过铝质岩石中含量低	海鸥型稀土元素配分模式
	稀土元素含量及 配分模式	无矿化型 矿化型: 四分组效应明显	轻微分异, (La/Yb)N < 30; Eu 负异常值变化范围大 未分异, (La/Yb)N 可以低至 0.3; Eu 负异常明显, Eu/Eu* 值可以低至 0.01	
	稳定及放射成因 同位素	A 型岩套的 Sr-Nd-Hf-Pb-O 同位素没有特定的值。A 型岩套的同位素特征与其侵位年龄和/或构造环境并没有明显的相关性, 这表明: A 型岩套的同位素特征源于不同源岩的混合, 或者是经历了复杂的分异过程, 亦或以上两种情况共同作用的结果。		

花岗岩^[4]。Frost 等^[4]指出,在修订的 Peacock 碱-钙指数 (Modified Alkali-Lime Index, MALI) 与 SiO₂ 图解中, A 型花岗岩可以是碱性、碱钙性、钙碱性,在极少数情况下甚至可以是钙性的;根据 Shand^[28] 定义的铝饱和度指数, A 型花岗岩可以是过碱质、准铝质或过铝质的。Bonin 也明确指出, A 型花岗岩是铁质的碱质到碱钙质,准铝质、弱过铝质或过碱质的花岗岩^[3]。



底图据文献[5]修改。数据来自文献[1, 11, 29, 30]

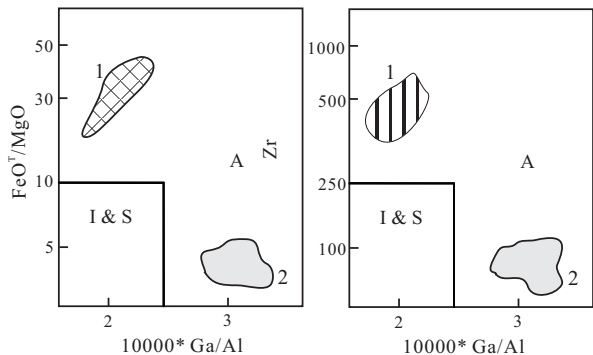
图 1 FeO^T/(FeO^T + MgO) 与 SiO₂ 图解

Fig. 1 FeO^T/(FeO^T + MgO) vs. SiO₂ diagram

Frost 等人^[4, 5]对铁质花岗岩(A 型花岗岩)的定义明确而清晰,该定义与岩石的具体成因以及产出的构造环境无关,其在应用上具有很好的可操作性。应用 SiO₂-Fe* 图解可以很容易地将铁质花岗

岩与镁质花岗岩区分开来^[4, 5, 31]。采用常量元素定义铁质花岗岩(A 型花岗岩)的本质在于其能够更好地反映岩浆的最基本的化学特征。与玄武岩不同,很多微量元素在花岗质熔体中并不是不相容元素^[32]。REE、U、Th 和 Zr 赋存于诸如磷灰石、锆石、钛铁矿、褐帘石、独居石等副矿物中,而这些副矿物在花岗岩中的含量取决于源岩组成、熔体的成分、部分熔融的温度、压力、流体含量及其组分,以及岩浆的结晶历史和物理化学条件(如:氧逸度和水活度)等多种复杂因素。同时,花岗质熔体中微量元素较常量元素而言其含量更易于受到混染作用的影响。与主要受制于造岩矿物的常量元素相比,微量元素指标与岩相学观察结果之间难以构建半定量或定量的联系。因此,以微量元素含量或其比值为特征厘定铁质花岗岩(A 型花岗岩)往往导致歧义的出现。例如:在以 Ga/Al 比值判别 A 型花岗岩的图解中^[7],当 Ga/Al > 2.6 时,不论其它指标(如:FeO^T/MgO、Zr、Nb、Y)的高低,都被判别为 A 型花岗岩;反之,当其它指标足够高时,即便 Ga/Al < 2.6 成分点也被判别为 A 型花岗岩(图 2)。

根据 Frost 等人^[4]定义,“铁质花岗岩”是纯粹描述性的术语,不依赖于岩石的具体成因、源岩乃至大地构造背景。铁质花岗岩的厘定基于常量元素特征而非岩相学或矿物学特征。因此,铁质花岗岩概念的外延远大于过碱性花岗岩。所以,含有碱性暗



1 号岩体与 2 号岩体的 Ga/Al 值明显不同,但都被认为是 A 型花岗岩

图 2 花岗岩的 Ga/Al 图解(底图据文献[7])

Fig. 2 Ga/Al diagrams for granitoids (modified from of [7])

色矿物的过碱性花岗岩属于铁质花岗岩,但并非所有的铁质花岗岩都是过碱性花岗岩。在认同 A 型花岗岩就是铁质花岗岩的前提下^[3, 4],将碱性暗色矿物作为判别 A 型花岗岩的矿物学标志的认识是不全面的^[33]。作为整体而言铁质花岗岩没有特定的矿物学标志,唯一的限制是这些岩石不可以含似长石矿物,否则不能称其为“花岗岩”!

A 型花岗岩这一概念在其被提出后 30 余年里,其内涵和外延都发生了不小的变化。由于历史原因,“A 型花岗岩”一词与花岗岩的成因分类(即“S-I-M-A”字母分类)紧密联系在一起。当前的研究表明,所谓的花岗岩的“S-I-M-A”成因分类不能真实地反映花岗岩的成因^[3, 34, 35]。因此,铁质花岗岩概念的提出对于重新认识“A 型花岗岩类”而言提供了极大的帮助。

2 铁质花岗岩的分类

历史上,对铁质花岗岩(A 型花岗岩)的分类方案不尽相同,其中影响比较大的是依据微量元素和大地构造背景的 A1、A2 亚类划分方案^[10],以及对应的 AA(非造山 A 型)和 PA(后造山 A 型)亚类划分方案^[36, 37]。如前所述,将花岗类岩石中的微量元素含量和比值作为判别岩浆来源和大地构造背景的依据,其岩石成因学依据并不牢靠,判别结果存在歧义。例如:在浙江瑶坑和北京昌平白查都发现了具有 A1 型微量元素特征但形成于后造山背景的 A2 型花岗岩^[38, 39]。近年来,巴西学者提出了 A 型花岗岩的氧化型和还原型的分类方案^[40],得到了广泛的关注。但是 Frost 等人认为铁质花岗岩(A 型花岗岩)的本质是其岩浆的还原性,“氧化型”这一前缀与“A 型花岗岩”概念本身相互矛盾,并不足取^[4]。

根据岩石化学指标对铁质花岗岩进行非成因的描述性分类^[4];即:依据铝过饱和指数(ASI)、碱度

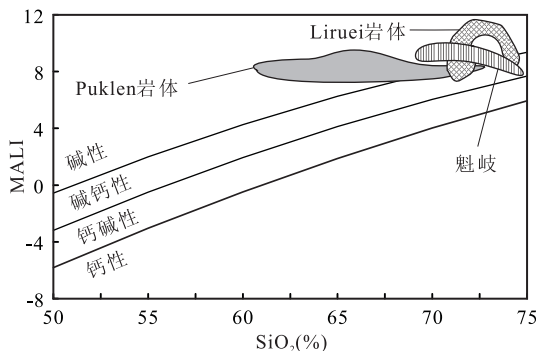
指数(AI),结合修正的 Peacock 碱-钙指数(MALI)将铁质花岗岩分为 8 个亚类(表 2)。

表 2 铁质花岗岩分类表

Table 2 The classification of the ferroan granitoids			
ASI	MALI	典型实例	参考文献
过碱质	碱性	Liruei, Nigeria	[41, 42]
	碱钙性	Brandberg, Namibia	[43]
	碱性	Bjerkreim-Sokndal, Norway	[44]
准铝质	碱钙性	Sherman granite, Wyoming, USA	[45]
	钙碱性	Granophyres of Skaergaard, Greenland	[18]
	钙性	Red Hill, Australia	[46]
过铝质	碱钙性	Lincoln granite, Wyoming, USA	[45]
	钙碱性	Mumbulla suite, Australia; Carajás, Brazil	[6, 40]

2.1 过碱质铁质花岗岩类

过碱质铁质花岗岩类 $ASI < 1$, 碱度指数 $AI = Al - Na - K$ (摩尔数) < 0 ($ANK < 1$), CIPW 标准矿物出现锥辉石(Ac)。岩相学上这类岩石含有钠闪石、钠铁闪石等碱性暗色矿物。过碱质铁质花岗岩全碱($Na_2O + K_2O$)含量高而 CaO 含量低,在 SiO_2 -MALI 图解中属于碱性(alkalic)或碱钙性(alkali-calcic)(图 3)。这一特征在岩相学上表现出其长石种属以钠质斜长石和钾长石为主,而斜长石的牌号较低。但 Frost 则认为,钙性和钙碱性的过碱质铁质花岗岩并不存在^[4]。



底图据文献[5]修改,数据来自文献[41, 47, 48]

图 3 MALI 指数($Na_2O + K_2O - CaO$)与 SiO_2 图解

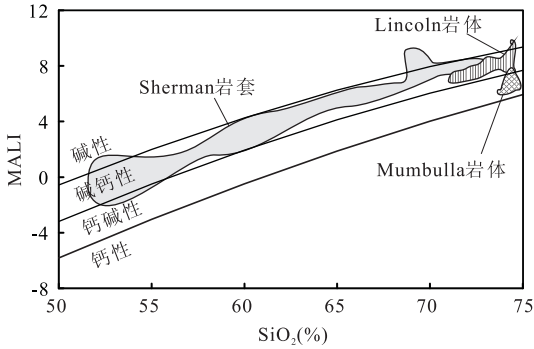
Fig. 3 MALI index ($Na_2O + K_2O - CaO$) vs. SiO_2 diagram

过碱质铁质花岗岩类(以及同成分的喷出岩)通常产出在裂谷带内或板块内部(如:洋岛),与基性岩构成双峰式岩浆组合,但其体积一般较基性岩体积小一个数量级^[49]。例如:亚速尔群岛的玄武岩-碱流岩组合^[50]。同时,也有少数过碱质铁质花岗岩体单独产出,而其周围并没有大规模基性岩出露,如:中国福建魁岐^[47]。

2.2 过铝质铁质花岗岩类

过铝质铁质花岗岩类 $ASI > 1$, CIPW 标准矿物出现刚玉(C),而不出现紫苏辉石(Hy)。岩相学上

这类岩石可以含黄玉、石榴子石、原生白云母等铝过饱和矿物。根据 MALI 指数分类,过铝质铁质花岗岩类通常是碱钙性或钙碱性的(图 4)。与过碱质铁质花岗岩类相比,其斜长石含量增大,而碱性长石的含量相对减少。碱性过铝质花岗岩和钙性的过铝质花岗岩,虽然理论上存在的可能性但是至今在自然界没有被发现。



底图据文献[5]修改,数据来自文献[6,44]

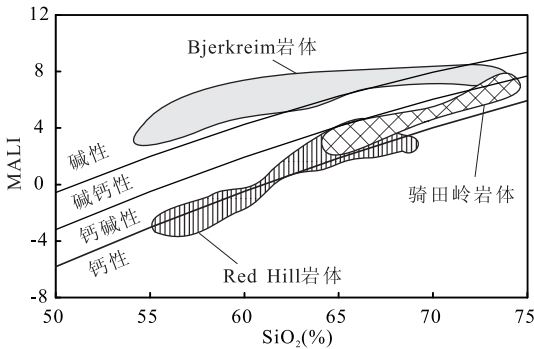
图 4 MALI 指数($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)与 SiO_2 图解

Fig. 4 MALI index ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$) vs. SiO_2 diagram

过铝质铁质花岗岩类可以呈独立岩体产出,如:美国西部 Silver Plume 和 St. Vrain 岩基,澳大利亚东部的 Mumbulla 岩体。可以作为复式岩基的一部分与准铝质铁质花岗岩类共生,如:美国西部怀俄明 Lincoln 过铝质铁质花岗岩与 Sherman 准铝质铁质花岗岩基的关系[44]。

2.3 准铝质铁质花岗岩类

准铝质铁质花岗岩类的 $\text{ASI} < 1$, 碱度指数 $\text{AI} > 0$ (即, $\text{ANK} > 1$), CIPW 标准矿物不出现辉石(Ac)或刚玉(C)。该类岩石中普遍出现黑云母。在 SiO_2 -MALI 图解中准铝质铁质花岗岩类可以属于碱性、碱钙性或钙碱性(图 5),这反映准铝质铁质花岗岩类的碱性长石与斜长石之间的相对含量变化范围较大。澳大利亚 Red Hill 辉绿岩中的花斑岩在



底图据文献[5]修改,数据来自文献[29,43,45]

图 5 MALI 指数($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)与 SiO_2 图解

Fig. 5 MALI index ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$) vs. SiO_2 diagram

SiO_2 -MALI 图解中横跨钙碱性和钙性的边界,其属于钙性花岗岩的部分是目前唯一发现的钙性准铝质铁质花岗岩[4]。

准铝质铁质花岗岩类可以呈独立岩体产出,如:挪威 Bjerkreim-Sokndal 岩体[43]、中国湖南骑田岭岩体[29];也可以作为复式岩基的一部分与过碱质铁质花岗岩类共生,如:纳米比亚 Brandberg 岩体[42]。

3 铁质花岗岩的成因

3.1 过碱质铁质花岗岩类的成因

过碱质铁质花岗岩类 MALI 值较高,属于 Peacock 定义的碱性、碱钙性,全碱含量高。这种岩石学特征反映其形成主要与基性岩浆的分离结晶作用有关,斜长石在此过程中扮演了重要角色。富钙斜长石的结晶分离使得岩浆中的 Al、Ca 含量减少,导致残余岩浆全碱含量升高,相对于 Al_2O_3 为过碱质,在 SiO_2 -MALI 图解中占据较高的位置。

洋岛玄武质火山活动的野外证据表明,拉斑玄武质岩浆分离结晶后的残余岩浆是过碱质铁质花岗岩成分。例如:Galapagos 群岛和冰岛的火山岩系显示很好的从基性到酸性岩浆的连续过渡[51, 52]。在这些拉斑玄武质岩浆中,磁铁矿在分异过程的晚期才结晶,导致残余的酸性岩浆显著富铁。同时,在裂谷带和洋岛环境产出的双峰式岩浆组合中,铁质花岗岩成分的酸性端元的体积比例普遍显著低于基性端元岩浆岩[49]。这支持过碱质铁质花岗岩类通过玄武质岩浆分离结晶作用而形成的成岩模式。

3.2 过铝质铁质花岗岩类的成因

野外地质学观察表明,过铝质铁质花岗岩类常呈岩基规模出露。例如,中国湖南九嶷山-西山岩体中, SiO_2 含量大于 70% 的过铝质岩石的出露面积远大于其 SiO_2 含量低于 70% 的准铝质岩石[40, 53]。这种岩基规模的过铝质铁质岩石难以用基性岩浆的分异结晶模式解释,其成因主要受控于地壳岩石的部分熔融作用。实验岩石学研究表明,壳源火成岩失水部分熔融能够形成过铝质铁质花岗岩成分的熔体。Skjerlie 和 Johnston[54]对含有约 20% 黑云母和约 2% 角闪石的闪长岩进行失水熔融实验,在 0.6 GPa 和 1.0 GPa 压力下得到的熔体成分均属于铁质,而且明显过铝,这一特征在熔融程度较低,即温度较低条件下尤为突出。

由玄武质岩浆分异而来的铁质花岗岩的 ASI 值存在随 SiO_2 含量增长而升高的趋势。因此,某些过铝质铁质花岗岩可以通过玄武质岩浆分异结合壳源物质的同化混染作用而形成。例如:美国西部与

玄武质岩浆活动关系密切的黄石流纹岩轻微过铝,就有可能是由于壳源岩石对分异的玄武岩浆的同化作用所致^[4];Sr-Nd 同位素地球化学特征也指示其经历了太古代壳源物质的混染^[55]。

3.3 准铝质铁质花岗岩类的成因

准铝质铁质花岗岩类的 MAI 值范围较大,其既可以由壳源岩石的部分熔融,也可以通过玄武质岩浆的结晶分异而形成。因此,对这类铁质花岗岩成因的争议较大。

Frost 倾向于准铝质铁质花岗岩类的形成受控于玄武岩结晶分异和地壳物质混染、熔融这两种机制的联合作用(类似于 AFC 过程)^[4]。其依据如下:准铝质铁质花岗岩浆的液相线温度高于 900℃。要达到如此高的熔融温度,必须有高温的玄武质岩浆的参与,而铁质花岗岩通常与玄武岩伴生。玄武质岩浆不仅提供了壳源岩石部分熔融所需的热能,而且通过自身的分异以及与壳源岩石的混染还为铁质花岗岩浆提供了大量的物质来源。铁质花岗岩通常被认为形成于地壳减薄的伸展构造发育区,在这种环境下上升的玄武质岩浆遇到长英质熔体时,可以使分异中的玄武质岩浆或多或少地被后者所混染。

Patino Douce^[56]对英云闪长岩(黑云母约 13%,角闪石约 13%)和花岗闪长岩(黑云母约 7%,普通角闪石约 6%)的熔融实验表明:中酸性火成岩在低压下失水熔融可以形成准铝质铁质花岗岩,据此强调低压是壳源的准铝质铁质花岗岩形成的主要物理条件。汪洋等^[57]在系统总结前人实验岩石学成果的基础上发现,中酸性火成岩在失水熔融时,首先形成过铝质铁质花岗岩成分的熔体,随着熔融温度增加可以形成准铝质铁质花岗岩成分的熔体,即:壳源准铝质铁质花岗岩的形成条件为高地温梯度,而非低压。澳大利亚 Red Hill 辉绿岩套中的花斑岩是玄武质岩浆的结晶分异形成的准铝质铁质花岗岩的实例^[4]。

4 讨 论

Frost 等^[4, 5]的铁质花岗岩定义及其分类方案虽然是非成因的描述性概念,但是铁质花岗岩的主要岩石化学特点与其成因机制之间具有隐含的密切联系。总体而言,铁质花岗岩的富铁特征反映其形成于相对还原的条件;相对富集碱质的特点表明,其相平衡体系中辉石和富钙斜长石的重要性。同时,铝饱和指数指示成岩过程中基性岩浆和富铝壳源岩石的相对贡献大小^[4]。

铁质花岗岩富铁贫镁特征的成因源于分离结晶

过程中磁铁矿、钛铁矿等高度富铁矿物相的结晶晚于辉石、橄榄石等富镁矿物相,或部分熔融体系中残留矿物相没有磁铁矿、钛铁矿等富铁矿物或比例很低。因此,铁质花岗岩体系体现相对还原的特征。最近有学者认为,低的氧逸度不是 A 型花岗岩的本质特征,并举例山东岚山 I 型和 A 型复合花岗岩的 A 型系列相对于 I 型系列而言温度更高,氧逸度也更高^[58]。实际上,岩浆体系中对氧化-还原状态敏感的矿物组合的相平衡是体系组分、氧逸度和温压条件的复杂函数^[59]。当体系温度升高后,平衡组合的氧逸度绝对值也会增加^[59, 60]。所以,不能将温压条件有差异的不同成分体系的氧逸度绝对值简单加以比较,来讨论不同系列花岗岩形成时的相对氧化-还原状态。故此,简单地将两类花岗岩的氧逸度绝对值加以比较,而忽视了温度、成分体系的差异,其结论是错误的。

正确认识铁质花岗岩体系的氧化-还原状态的相平衡含义有助于深刻理解所谓“氧化型”A 型花岗岩的成因。Dall’Agnol 等^[61, 62]将 A 型花岗岩分为“还原型”和“氧化型”两类。“还原型”A 型花岗岩具有高的全岩及黑云母、角闪石 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 比值(> 0.88)、以钛铁矿为主要的铁钛氧化矿物相,铁钛氧化矿物比例小于 1.0%、低氧逸度($f_{\text{O}_2} < \text{NNO}$)和低的磁化率值($< 1.0 \times 10^{-3}$);而“氧化型”A 型花岗岩具有较低的全岩及黑云母、角闪石的 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 比值为 0.8 ~ 0.94、以磁铁矿和榍石为主要的铁钛氧化矿物相,铁钛氧化矿物占 0.5% ~ 2.0%、高的氧逸度($f_{\text{O}_2} > \text{NNO} + 0.5$)、高的磁化率值($> 5.0 \times 10^{-3}$)。值得注意的是,根据 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 比值,“氧化型”A 型花岗岩仍然是铁质花岗岩。一方面,岩石的源区成分差异、熔融温度的高低都会影响熔融体系平衡时的氧逸度值^[46]。另一方面,我们认为,若岩浆在结晶演化降温过程中偏离部分熔融时氧化-还原缓冲体系(如: NNO)的 f_{O_2} -T 等变线,也可以导致最终结晶的铁钛氧化矿物相种属、成分表现出更加“氧化”的特征。同时,“还原型”和“氧化型”判别图解中两种类型的区域重叠的部分较多,表明两者之间是过渡变化的。因此,“还原型”和“氧化型”不能反映铁质花岗岩成岩过程的实质性差异,不是一个很好的分类方案。

近年来,“铝质 A 型花岗岩”这一术语得到了国内研究者的青睐。值得注意的是,该术语的创始人没有给出一个定量化的判别标准来界定“铝质 A 型

花岗岩”^[63];而且该术语的创造人已明确提出放弃该术语,以避免不必要的混乱^[64]。在描述性的铁质花岗岩分类系统中,澳大利亚 Lachlan 造山带典型的“铝质 A 型花岗岩”属于准铝质碱钙性、钙碱性和过铝质碱钙性、钙碱性的铁质花岗岩。如此,“铝质 A 型花岗岩”这一术语的外延很大,可以包括过碱质铁质花岗岩以外的所有亚类。对于“铝质”与过碱质铁质花岗岩之间成因的差异,李小伟等^[58]解释为源区的相组分不同。他们认为:“铝质”铁质花岗岩的早期结晶相是钙质闪石,闪石的分离结晶导致熔体 ASI 值升高,从而熔体成分相对富 Al;过碱质铁质花岗岩的早期结晶相是富钙斜长石,而钙长石组分的分离结晶导致熔体 Al 含量和 ASI 值下降,从而熔体成分富碱质。这一论证存在重要的疏漏。首先,壳源岩石失水部分熔融实验表明,闪石并非是在所有温压条件下都存在的残留矿物相,在低压(0.4 ~ 0.6 GPa)下残留相没有闪石^[54, 56]。所以用闪石的分离结晶或残留来解释“铝质”铁质花岗岩的富 Al 特征是不全面的。其次,李小伟等^[58]错误地认为钙长石的 ASI 值等于 2;实际上长石三个端元组分的 ASI 值均等于 1^[28]。因此,钙长石组分的分离结晶虽然可以导致熔体 Al 含量下降,但不可能改变熔体的 ASI 值,而是导致熔体的碱度指数 AI(或 ANK)值下降。

仔细考察铁质花岗岩的亚类划分,可以发现:整体而论,过碱质亚类的($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)相对于 CaO 最高,在 SiO_2 -MALI 图解中属于碱性和碱钙性;过铝质亚类的($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)相对于 CaO 最低,在 SiO_2 -MALI 图解中属于碱钙性和钙碱性;准铝质亚类则介于前两者之间(图 3 ~ 5)。因此,铁质花岗岩的全碱与钙含量的相对含量与其铝饱和指数之间存在一定的相关性。这种相关性具有隐含的岩石成因意义。大量实验岩石学研究表明,与花岗质熔体平衡的主要造岩矿物在低压(< 0.7 GPa)下是斜长石和斜方辉石,压力升高后变为斜长石和单斜辉石^[49, 54, 56, 65]。因此,低压下分异演化的基性岩浆首先结晶富钙斜长石,使得残余熔体的 Al、Ca 含量下降,从而使熔体碱度指数 AI 值下降,出现过碱质的岩石化学特征。升高压力后(> 0.7 GPa),基性岩浆同时结晶富钙斜长石和单斜辉石,导致残余熔体的 Al、Ca 含量下降,其中 Ca 下降得更多(单斜辉石的分离所致),从而使熔体 ASI 值相对升高,表现出相对富铝而非过碱质的岩石化学特征。若压力更高,斜长石在体系中变得不稳定,其分离结晶的比例远小于单斜辉石时,会导致残余熔体的 Ca 较 Al 含

量下降得更为显著,熔体 ASI 值升高更为明显,出现过铝质的岩石化学特征。同理,部分熔融过程中,低压下的残留相主要是富钙斜长石和斜方辉石,与之平衡的熔体易于出现过碱质的特征;压力升高,残留相主要是斜长石和单斜辉石,与之平衡的熔体相对富铝;若压力更高,斜长石在体系中变得不稳定,在残留相中的比例远小于单斜辉石时,会导致残余熔体出现过铝质的岩石化学特征。据此我们得到一个重要的推论:虽然铁质花岗岩浆的铝饱和和特征受源岩成分等因素影响^[4],但铁质花岗岩的铝饱和和特征与其形成的压力之间存在相关性,即相对高压下分离结晶或部分熔融过程趋向于形成过铝质铁质花岗岩,而低压下趋向于形成碱质相对富集的铁质花岗岩。这一推论得到了实例研究的支持。例如:Anderson 和 Thomas^[16]对美国西部过铝质铁质花岗岩(岩性为二云母矽线石花岗岩)的研究表明,其起源压力大于 1.0 GPa、对应的深度在 36 km 以上。又如:汪洋^[66]对南岭柯树北、寨背和西山“铝质”铁质花岗岩的研究表明,其起源深度至少大于 14 km,部分熔融源区压力在 0.8 ~ 1.0 GPa 之间,相当于 28 ~ 36 km 深度。

综合上述可以看出,常量元素化学特征不但是厘定铁质花岗岩及其亚类的主要指标,而且隐含了铁质花岗岩成岩机制的重要信息。因此,Frost 等人的纯粹描述性分类方案在某种程度上深刻地反映了铁质花岗岩(A 型花岗岩)多样性的本质。能够反映火成岩岩相学及其成因本质的分类才是好的分类方案^[34]。

5 结 论

A 型花岗岩具有高 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比值,其铁含量相对于镁含量明显富集是其最显著和最本质的特点,故此称其为铁质花岗岩。作为描述性的术语,“铁质花岗岩(A 型花岗岩)”名称本身不具有特定的岩石成因意义。铁质花岗岩的厘定并不需要微量元素和同位素地球化学依据。

铁质花岗岩不是什么“神秘”或“特殊”的火成岩,它包含了具有相当广泛的岩相学和化学成分变化的多种花岗质岩石。铁质花岗岩可以是过碱质、过铝质和准铝质的。同时,铁质花岗岩可以属于 Peacock 定义的碱性、碱钙性或钙碱性范畴。与微量元素指标相比,基于常量元素指标的分类方案与岩石的岩相学、矿物学特征有内在联系。由于 Frost 等人的铁质花岗岩分类是描述性的,与具体的成岩机制或大地构造背景无关,所以该分类方案

具有普适性和通用性。

铁质花岗岩的多样性暗示其成岩机制的多样性,其成因可归结为结晶分异与部分熔融两种端元过程,亦或两种端元机制的结合。

参考文献 (References):

- [1] Loiselle M C, Wones D. Characteristics and origin of anorogenic granites [R]. Geological Society of America (Abstracts with Programs), 1979, 11: 468.
- [2] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173—174.
- [3] Bonin B. A-type granites and related rocks; evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007, 97: 1—29.
- [4] Frost C D, Frost B R. On ferroan (A-type) granitoid: Their compositional variability and modes of origin[J]. Journal of Petrology, 2011, 52(1): 39—53.
- [5] Frost B R, Arculus R J, Barnes C G, Collins W J, Ellis D J, Frost C D. A geochemical classification of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42: 2033—2048.
- [6] Collins W J, Beams D, White J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia [J]. Contrib. to Mineral. and Petrol., 1982, 80: 189—200.
- [7] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contrib. to Mineral. and Petrol., 1987, 95: 407—419.
- [8] Creaser R A, Price R C, Wormald R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model [J]. Geology, 1991, 19: 163—166.
- [9] Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26: 115—134.
- [10] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641—644.
- [11] 陈培荣, 章邦桐. A型花岗岩类研究综述[J]. 国外花岗岩类地质与矿产, 1994, 4(4): 9—14.
- [12] Plavsa D, Collins A S, Foden J F, Kropinski L, Santosh M, Chetty T R K, Clark C. Delineating crustal domains in Peninsular India: Age and chemistry of orthopyroxene-bearing felsic gneisses in the Madurai Block [J]. Precam. Res., 2012, 198: 77—93.
- [13] Fourie D S, Harris C. O-isotope study of the bushveld complex granites and granophyres: Constraints on source composition, and assimilation[J]. Journal of Petrology, 2011, 52(11): 2221—2242.
- [14] Clemens J D, Birch W D, Dudley R A. S-type ignimbrites with polybaric crystallization histories: The Tolmie Igneous Complex, Central Victoria, Australia[J]. Contrib. to Mineral. and Petrol., 2011, 162(6): 1315—1337.
- [15] 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, 199(3-4): 621—641.
- [16] Anderson J L, Thomas W M. Proterozoic anorogenic two-mica granites: Silver Plume and St. Vrain batholiths of Colorado[J]. Geology, 1985, 13: 177—180.
- [17] Taylor R D. Petrological and geochemical characteristics of the Pleasant Ridge zinnwaldite-topaz granite, southern New Brunswick, and comparisons with other topaz-bearing felsic rocks[J]. Canadian Mineralogist, 1992, 30: 895—921.
- [18] Wager L R, Brown G M. Layered igneous rocks[M]. San Francisco, CA: Freeman W H, 1967: 1—588.
- [19] Haapala I, Rämö O T. Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites of Finland [A]. in: Stein H J, Hannah J L (eds), Ore-bearing granite systems; petrogenesis and mineralizing processes[C]. Geological Society of America Special Papers, 1990, 246: 275—286.
- [20] Rämö O T, Haapala I. One hundred years of rapakivi granite [J]. Mineralogy and Petrology, 1995, 52: 129—185.
- [21] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 杨策. 骑田岭岩体[A]. 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[C]. 北京: 科学出版社, 2007: 520—533.
- [22] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A型花岗岩研究现状及其述评[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 57—66.
- [23] 贾小辉, 王强, 唐功建. A型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465—480.
- [24] Whalen J B. A-type granites: >25 years later[J]. Geochim. Comochimi. Acta, 2005, 69 (Suppl.): A84.
- [25] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, Brent I A M. 福建沿海铝质 A型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 313—321.
- [26] Le Maitre R W. Igneous rocks: A classification and glossary of terms (2nd Edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [27] Bonin B. Death of super-continent and birth of oceans heralded by discrete A-type granite igneous events: the case of the Variscan-Alpine Europe[J]. Journal of Geosciences, 2008, 53: 237—252.
- [28] Shand S J. The eruptive rocks (2nd Edition) [M]. New York: John Wiley, 1943.
- [29] 邓希光, 李献华, 刘义茂, 黄革非, 侯茂松. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(2): 93—102.
- [30] 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 湘南西山铝质 A型花岗岩质火山侵入杂岩的地球化学及其形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 15—23.
- [31] Frost B R, Frost C D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks[J]. Journal of Petrology, 2008, 49: 1955—1969.
- [32] Bea F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: Implications for the chemistry of crustal melts [J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 521—552.
- [33] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217—1238.
- [34] Philpotts A, Ague J. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology (2nd Edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [35] Winter J D. Principles of igneous and metamorphic petrology (2nd Edition) [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2009.

- [36] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 靳满元. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B), 1995, 25(4): 418—426.
- [37] 许保良, 阎国翰, 张臣, 李之彤, 何中甫. A型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 113—124.
- [38] 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌, 胡建, 李真. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1431—1440.
- [39] 汪洋. 北京白查A型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 13—24.
- [40] Dall' Agnol R, Oliveira D C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi type granites of Carajaos, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites [J]. Lithos, 2007, 93: 215—233.
- [41] Jacobson R R E, MacLeod W N, Black R. Ring-complexes in the younger granite province of northern Nigeria[Z]. Geological Society, London, Memoirs, 1958, 1: 71.
- [42] Orajaka I P. Geochemistry of Kaffo Valley albite-riebeckite-granite, Liruei granite ring-complex, northern Nigeria[J]. Chemical Geology, 1986, 56: 85—92.
- [43] Schmitt A K, Emmermann R, Trumbull, R B, Buhn B, Henjes-Kunst F. Petrogenesis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Brandberg complex, Namibia: Evidence for a major mantle contribution in metaluminous and peralkaline granites [J]. Journal of Petrology, 2000, 41: 1207—1239.
- [44] Duchesne J C, Wilmart E. Igneous charnockites and related rocks from the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion (south-west Norway): A jotunite (hypersthene monzodiorite)-derived A-type granitoid suite[J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 337—369.
- [45] Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming: A reduced rapakivi-type anorogenic granite[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1771—1802.
- [46] McDougall I. Differentiation of the Tasmanian dolerites: Red Hill dolerite granophyre association[J]. Geological Society of America Bulletin, 1962, 73: 279—316.
- [47] Martin H, Bonin B, Capdevila R, Jahn B M, Lameyre J, Wang Y. The Kuqi peralkaline granite complex (SE China): Petrology and geochemistry[J]. Journal of Petrology, 1994, 35: 983—1015.
- [48] Marks M, Vennemann T, Siebel W, Markl G. Quantification of magmatic and hydrothermal processes in a peralkaline syenite-alkali granite complex based on textures, phase equilibria, and stable and radiogenic isotopes[J]. Journal of Petrology, 2003, 44: 1247—1280.
- [49] Turner S, Rushmer T. 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, 2010, 100: 1—10.
- [50] Mungall J E, Martin R F. Petrogenesis of basalt-comendite and basalt-pantellerite series, Terceira, Azores, and some implications for the origin of ocean-island rhyolites[J]. Contrib. to Mineral. and Petrol., 1995, 119: 43—55.
- [51] McBirney A R, Williams H. Geology and Petrology of the Galapagos Islands [J]. Geological Society of America Memoirs, 1969, 118: 1—197.
- [52] Carmichael I S E. The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland[J]. Journal of Petrology, 1964, 5: 435—460.
- [53] 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 湖南金鸡岭铝质A型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学, 2005, 34(3): 215—226.
- [54] Skjerlie K P, Johnston A D. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of an orogenic granites[J]. Journal of Petrology, 1993, 34: 785—815.
- [55] Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field[J]. Journal of Petrology, 1991, 32: 63—138.
- [56] Patino Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. Geology, 1997, 25: 743—746.
- [57] 汪洋, 程素华, 全立华. 高硅铁质花岗岩成因的实验岩石学证据[J]. 地质构造, 2011, 21: 196—197.
- [58] 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成. 关于型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 2010, 29(2-3): 278—285.
- [59] Frost B R. Introduction to oxygen fugacity and its petrologic importance[J]. Reviews in Mineralogy, 1991, 25: 1—9.
- [60] 任启江. 火成岩及其有关矿床中的钛铁氧化物研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1—249.
- [61] Dall' Agnol R, Scaillet B, Pichavant M. An experimental study of a Lower Proterozoic A-type granite from the eastern Amazonian Craton, Brazil[J]. Journal of Petrology, 1999, 40(11): 1673—1698.
- [62] Dall' Agnol R, Teixeira N P, Rämö O T, Moura C A V, Macambira M J B, Oliveira D C. Petrogenesis of the paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil[J]. Lithos, 2005, 80: 101—129.
- [63] King P L, White A J, Chappell B W. Characterization and origin of aluminous A-type granite of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371—391.
- [64] King P L, Chappell B W, Allen C M, White A J R. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah suite[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48: 501—514.
- [65] Patino Douce A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origins of granitic magmas? [A]. Castro A, Fernandez C, Vigneresse J L. Understanding granites: Integrating new and classical techniques [C]. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 1999, 168: 55—75.
- [66] 汪洋. 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, 2008, 32(3): 365—381.