

文章编号:1007-3701(2004)01-0055-09

花岗质岩石新地球化学分类介绍及有关问题评述

涂绍雄,王桂华

(宜昌地质矿产研究所,湖北 宜昌 443003)

摘要:Frost 等主要依据花岗岩类常量元素分析,考虑铁镁指数,修改的碱钙指数(MALI)和铝饱和指数三个参数,将花岗岩类岩石划分为 16 个成分组,即 16 种类型。该分类方案能对岩浆来源和大地构造背景提供信息,基本上保留了以前一些花岗岩分类方案的最佳品质。本文对这个分类方案进行了详细介绍,并对各种花岗岩类分类方案进行了简要评述。

关键词:花岗质岩石;地球化学分类;评述

中图分类号:P588.12⁺1

文献标识码:A

花岗岩类是大陆地壳最丰富的岩石类型,其分类系统历来为地质学者所关注。在过去 30 年内已建立大约 20 个不同的分类体系(Barbarin, 1999)^[1],他们大多属于成因分类或大地构造分类。最近,Frost 等(2001)^[2]提出了一种非成因、非大地构造的地球化学分类方案,这个分类方案具有如下一些优点:(1)主要是依据常量元素而非微量元素,二者相比,前者比后者更具普遍意义;(2)能将成分广泛的花岗质岩石全部包容,而有些分类不能包容全部花岗质岩石;(3)能对岩浆来源和大地构造背景提供信息。故它基本上保存了以前分类方案的最佳品质,对今后研究花岗质岩石的成分、类型、成因和大地构造背景无疑将起到推动作用。

1 新化学分类方案介绍

Frost 等所提出的分类方案分三个层次。第一层次由岩石的铁镁比值即 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 确定,这是一个载有花岗质岩浆分异历史信息的变量。第二层次是经修改的碱钙指数($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$),它被表达在岩石中长石的成分和含量上,与花岗质岩浆的来源有关。第三层次为 Al 饱和指数,它被表达在岩石的云母和次要矿物中,与岩浆来源

和熔融条件有关。

该分类方案主要通过一些独特的花岗岩类组合来建立,其中包括北美西部科迪勒拉岩基的花岗岩类,一般比科迪勒拉花岗岩类更富碱的加里东花岗岩类以及特别富碱和高场强元素的 A 型花岗岩类。

1.1 铁镁比值 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$

早就认识到,岩浆结晶分异过程中经历了 Fe 的富集而 SiO_2 保持在低水平的岩套,与经历了 SiO_2 富集而 FeO 相对 MgO 微富集的岩套之间有着较大差异(Nockold 和 Allen, 1956)。这两种情况通常称为“拉斑玄武质”趋势和“钙碱性”趋势。Miyashiro (1970)^[3]证明,遵循这两种趋势的岩石可在 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 对 SiO_2 的投影图上进行区分。图 1a 即为这种投影,图中包括北美西部、Baltica、非洲和澳大利亚的 175 个 A 型花岗岩类和北美中生代岩基的 344 个科迪勒拉花岗岩类,它们极好地被 Miyashiro 的边界线(粗虚线)分开。

Frost 等认为, $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 比值实际上与岩石的碱度无关,“钙碱性”和“拉斑玄武质”名称使用不当,故改用“铁质”和“镁质”来描述这两种类型。他们将 Miyashiro 的边界线在低的 SiO_2 端作了修改,使之成为线性的(图 1a 中的粗实线),并拟合了这条线的方程,即 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})=0.446+0.0046\times\text{SiO}_2$ 。边界线修改后,97% 的 A 型花岗岩类分布在新边界线之上,93% 的科迪勒拉

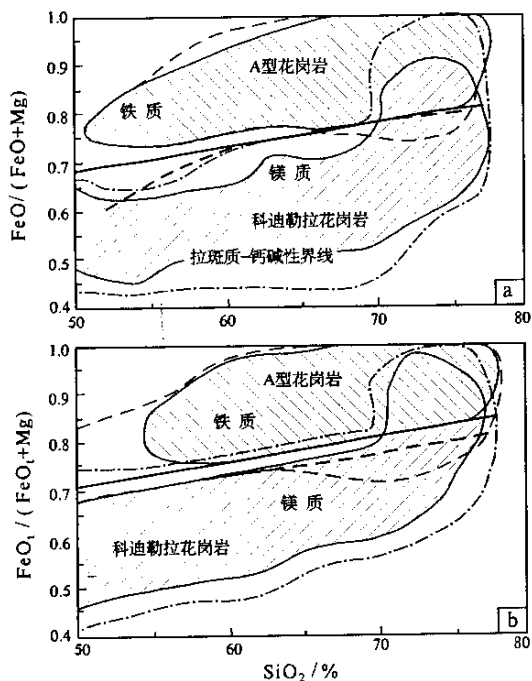


图 1 铁质侵入体与镁质侵入体界线的 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (a) 和 $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ (b) 对 SiO_2 图解

Fig. 1 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (a) and $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ (b) vs SiO_2 diagrams showing the boundary between ferroan plutons and magnesian plutons (粗虚线为 Miyashiro (1970) 界线, 粗实线为 Frost 等的界线, 细虚线和锁线分别为 A 型花岗岩和科迪勒拉花岗岩所有分析结果的范围)

花岗岩类分布于其下, 穿过新边界线的大多数偏离都发生在低 SiO_2 端。

考虑到许多化学分析结果没有区分三价 Fe 和二价 Fe, 故设置了一个变量 $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ 比值, 用于没有区分三价 Fe 和二价 Fe 的分析结果。图 1b 即为 $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ 对 SiO_2 的投影图, 该图区分了 486 个 A 型花岗岩类和 538 个科迪勒拉花岗岩类的样品。该图粗实线的线性方程为: $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO}) = 0.486 + 0.0046 \times \text{SiO}_2$ 。在该图上, 约 96% 的 A 型花岗岩类位于边界线之上, 约 83% 的科迪勒拉花岗岩位于边界线之下。而且, 越界的样品不仅仅限于 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 的岩石, 而是整个 SiO_2 含量范围内都有这种样品出现。

1.2 修改的碱钙指数或称 MALI ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$)

Peacock (1931)^[4] 曾提出火成岩系列的碱钙分类, 他根据碱钙指数将火山岩套分为 4 类。所谓碱钙指数, 就是一个熔岩岩套中 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 与 CaO 相等时的 SiO_2 含量, 碱钙指数 > 61 者为钙性, 56

~61 者称钙碱性, 51~56 者为碱钙性, < 51 者为碱性。该分类方案除 SiO_2 值恰在交点处者外, 一般均难以使用。Frost 等将其扩展到更广泛的 SiO_2 含量范围, 并通过引入变量 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 将分类所必须的 3 个变量 (SiO_2 、 CaO 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 减少至 2 个, 该引入变量即称为修改的碱钙指数。对于任意岩套, 修改的碱钙指数随 SiO_2 增加而升高, 当其为 0 时, 则 SiO_2 含量相当于 Peacock (1931) 的碱钙指数。Frost 等还拟合了区分钙性、钙碱性、碱钙性和碱性区的曲线, 使其边界平行于常见侵入岩的成分趋势 (图 2), 且对于每一边界线在 Peacock (1931) 确定的碱钙指数处, 修改的碱钙指数 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}=0$ 。拟合的边界线分别为, a 与 a-c 之间: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO} = -41.86 + 1.112 \times \text{SiO}_2 - 0.00572 \times (\text{SiO}_2)^2$, a-c 与 c-a: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO} = -44.72 + 1.094 \times \text{SiO}_2 - 0.00527 \times (\text{SiO}_2)^2$, c-a 与 c: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO} = -45.36 + 1.0043 \times \text{SiO}_2 - 0.00427 \times (\text{SiO}_2)^2$ 。

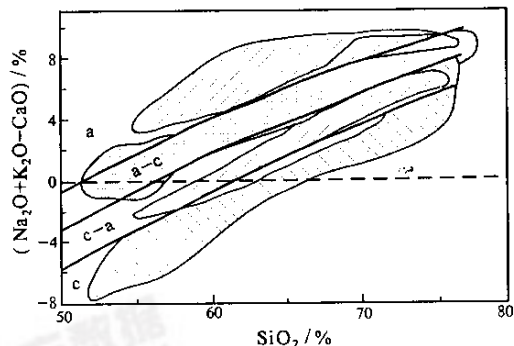


图 2 碱性(a)、碱钙性(a-c)、钙碱性(c-a)和钙性(c)花岗岩类岩石近似范围的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 对 SiO_2 图

Fig. 2 Plot of $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ vs SiO_2 showing approximate ranges for the alkalic, alkalic-calcic, calcic-alkalic, and calcic rock series

(细实线圈定的范围由上而下分别为: Bjerkreim-Sokndal 碱性侵入体; Sherman 碱钙性岩基; Tuolumne 钙碱性岩系和南加利福利亚钙性岩基; 粗实线为 Frost 等拟合的界线)

1.3 铝饱和指数 (ASI)

铝饱和指数 (ASI) 为 Shand (1943)^[5] 提出, 它被定义为 $\text{Al}/(\text{Ca}-1.67\text{P}+\text{Na}+\text{K})$ 摩尔比。这种 ASI 表达式考虑到磷灰石的存在, 因此, $\text{ASI} > 1.0$ 的岩石含刚玉标准分子, 被认为是过铝的 (Zen, 1988)。这意味着铝含量高于其中长石所能容纳的, 因而必然还存在其他的富铝矿物。对弱过

铝的岩石而言,这种矿物可能是铝质黑云母,而较强过铝的花岗岩则可能为白云母、堇青石、石榴石或 Al_2SiO_5 多形。尽管通常认为强过铝熔体形成于沉积源岩(Chappell 和 White,1974)^[6],但它也可以通过含黑云母的偏铝长英质岩石熔融形成(Miller,1985),甚至可由镁铁质岩石在水过剩条件下熔融形成(Ellis 和 Thompsom,1986)。

如果 $ASI < 1.0$,而 $Na + K < Al$,则岩石为偏铝质。这类岩石在 Al 进入长石后可能有过剩的 Ca,因而偏铝岩石含有诸如普通角闪石和普通辉石之类的钙质矿物。而缺乏白云母或钠质铁镁矿物。如果 $ASI < 1.0$ 且 $Na + K > Al$,则岩石为过碱性。这类岩石中的碱在形成长石后有过剩,这意味着一些碱,特别是 Na,必然进入铁镁硅酸盐中。在弱过碱性岩石中,碱性元素可进入普通角闪石,而强过碱性岩石的特征矿物是钠质角闪石和辉石。

1.4 花岗岩岩石化学成分类型

根据上述三个参数,花岗岩类的成分范围可划

分为 16 个成分组,即 16 种类型。先根据 $FeO/(FeO + MgO)$ 比值分出铁质和镁质花岗岩类;再根据修改的碱钙指数将二者各分为 4 个组,每一组再根据铝饱和指数划分为 2 个亚组(表 1)。

镁质和铁质花岗岩类的成分范围互为镜像反映。最常见的镁质花岗岩类是钙性的和钙碱性的,而镁质碱钙性和碱性花岗岩类实例较少。表 1 所列的镁质碱性岩石为正长岩、石英正长岩和霞石正长岩,而非严格意义上的花岗岩。相反,对于铁质花岗岩类而言,钙性岩石未知,钙碱性岩石极少见,而碱钙性和碱性岩石却十分丰富。在镁质花岗岩类中,过铝成分在钙碱性岩石中最为常见,尽管它们也出现在碱钙性和钙性花岗岩类中,且以含堇青石的英云闪长岩和奥长花岗岩产出(Shimura 等,1992;Johnsor 等,1997)。铁质系列中多数花岗岩是偏铝的,但过铝类型也可出现碱钙性岩石(Anderson 和 Thomas,1985)或钙碱性岩石(King 等,1997)中。

表 1 花岗岩类的地球化学分类
Table 1 A geochemical classification scheme for grantoids

$FeO/(FeO + MgO)$ <i>MALI</i>		<i>ASI</i> 值		岩石类型	一般产状
铁质花岗岩类	钙性	偏铝	未知		
		过铝	未知		
	钙碱性	偏铝	花岗岩		某些 A 型侵入体,镁铁质侵入体中的花斑岩
		过铝	二云母花岗岩		某些 A 型侵入体
镁质花岗岩类	碱钙性	偏铝	铁闪长岩、正长岩、花岗岩		A 型花岗岩,与镁铁质岩墙和岩体伴生的花斑岩
		过铝	二云母花岗岩		
	碱性	偏铝	斜长岩、铁闪长岩、二长岩、花岗岩		板内侵入体,碱性火山岩核部的侵入体
		过碱	碱性辉长岩、正长岩、碱性花岗岩		
	钙性	偏铝	闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩		科迪勒拉岩基向海一侧的侵入体,岛弧中的侵入体,斜长花岗岩侵入体
		过铝			
	钙碱性	偏铝	闪长岩、二长闪长岩、花岗闪长岩		科迪勒拉岩基主体中的侵入体
		过铝			
	碱钙性	偏铝	二长岩、正长岩、高 K 花岗岩		科迪勒拉岩基向陆一侧的侵入体,与超厚地壳剥离有关的侵入体
		过铝			
	碱性	偏铝	二长岩、正长岩、花岗岩		科迪勒拉向陆一侧的侵入体
		过碱	碱性长石正长岩、碱性长石花岗岩		

2 与某些花岗岩类型的关系

2.1 科迪勒拉岩基

地球上最丰富的花岗岩类也许是在岩浆弧出露的侵入岩,大多数研究者都将它们作为一种独特

的地球化学类型,称之为火山弧花岗岩(Pearce 等,1984)^[7]、岛弧和大陆弧花岗岩类(Maniar 等,1989)^[8]或含角闪石的钙碱性花岗岩(Barbarin,1999)。这一组的大多数岩石都被认为是 Chappell 和 White(1974)的 I 型花岗岩类的一部分。

在 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 对 SiO_2 图上,美国西部和墨西哥西北部科迪勒拉岩基中的花岗岩类以镁质为主(图 3a 左图),在 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 对 SiO_2 图上大多为钙性和钙碱性(图 3a 右图)。图 3a 右图中的科迪勒拉岩基的钙性侵入体常常位于岩基带朝洋一侧,钙碱性侵入体则靠陆内一侧,少数的碱钙性侵入体则更靠内陆。

其中绝大多数 $\text{SiO}_2 < 70\%$ 的岩石属镁质系列,少数 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 的岩石是铁质花岗岩类。从铝饱和指数进行分析,科迪勒拉岩基偏铝和过铝岩石的数量大致相等,偏铝岩石 Fe 值较低,而过铝岩石倾向于有较高的 Fe 值。事实上,科迪勒拉岩套的所有铁质花岗岩类都是过铝的。

2.2 过铝淡色花岗岩

大多数研究者认识到,过铝淡色花岗岩是花岗

岩类系列的重要组成部分,它们被称为 S 型 (Chappell 和 White, 1974)、同碰撞花岗岩类 (Pearce 等, 1984)、大陆碰撞花岗岩类 (Maniar 和 Piccoli, 1989) 和白云母过铝花岗岩 (Barbarin, 1999)。这些岩石都是含白云母的高 SiO_2 花岗岩,在超厚变质带的核部以独立的侵入体产出 (Le Fort, 1981)。它们的独特性在于一般不与较富镁铁质的岩石伴生,被认为是由于造山带的热松弛和/或剥露阶段(即顺时针 $p-T-t$ 轨迹等热减压作用过程中, England 和 Thompson, 1984) 变质沉积岩的部分熔融而形成。

这类岩石作为一个组和作为一个单独的侵入体,它们都占有从镁质至铁质、从钙性至碱性全部的花岗岩类成分范围(图 3b)。正如其名称所显示的那样,它们所共有的唯一一致的成分特征是其高

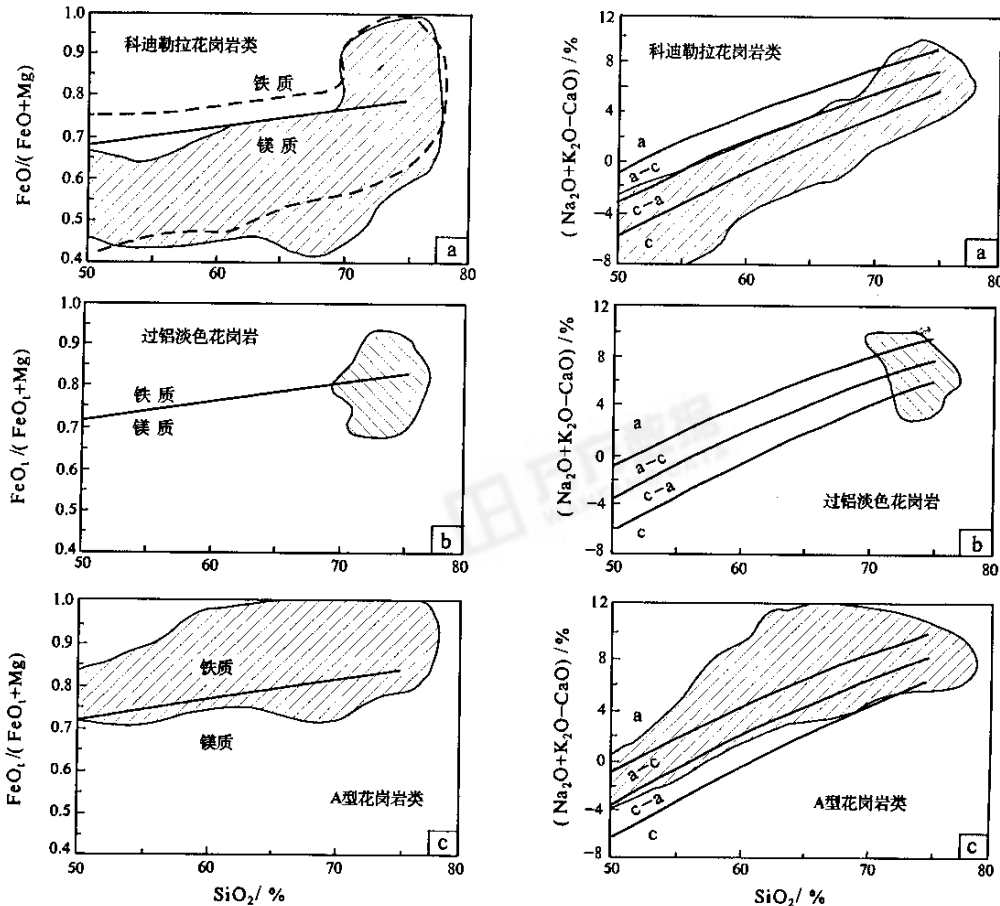


图 3 科迪勒拉岩基(a)、过铝淡色花岗岩(b)和 A 型花岗岩类(c)成分范围的 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ [$\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$] 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 对 SiO_2 图

Fig. 3 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ [$\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$] and $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ vs SiO_2 diagrams showing the composition ranges from the Cordilleran batholiths, peraluminous leucogranites, and A-type

的 SiO_2 含量和强过铝性质。

2.3 A 型花岗岩类

被 Loiselle 等^[9]命名为 A 型的独特的、钾质花岗岩不同于科迪勒拉岩基的花岗岩类(图 3c)。“A 型”岩石极富 Fe, 投影在铁质碱钙性和铁质碱性区。少数岩套为铁质钙碱性, 例如 Bungar 山的紫苏花岗岩(Sheraton 等, 1992)和 Red 山的花斑岩(McDougall, 1962)。铁质碱性岩石也包括与斜长岩和层状镁铁质侵入体伴生的二长质和正长质岩石(Kolker 和 Lindsley, 1989; Scoates 等, 1996; Duchesne 和 Wilmart, 1997)。碱性杂岩的晚阶段部分, 例如 Coldwell 杂岩(Mitchell 和 Platt, 1978), Gardar 区(Ferguson, 1970)和 Montereigian 区(Valiquette 和 Archambault, 1970)的岩石也都投影在铁质碱性区。

大多数 A 型花岗岩类是偏铝的, 尽管其中有一些是过碱性的, 例如尼日利亚的钠质花岗岩(Bowden 和 Turner, 1974)、Pikes 峰的一部分(Smith 等, 1999)和 Sherman 岩基(Frost 等, 1999)。Anderson 和 Thomas(1985)曾报道过铝的 A 型花岗岩类。

2.4 加里东花岗岩类

第四种主要的花岗质岩石类型由高 K 碱钙性花岗岩类组成, 爱尔兰和不列颠的加里东造山期后花岗岩为典型代表。这类侵入体常被称为造山后花岗岩(Maniar 和 Piccoli, 1989)、橄榄玄粗质花岗岩类(Duchesne 等, 1998; Liegeois 等, 1998)和富 K 钙碱性花岗岩类(Barbarin, 1999)。这类岩石绝大多数是碱钙性和镁质的, 尽管在 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 时其中有些花岗岩类为钙碱性。它们的独特性在于其高的钾含量和缺乏铁富集(图 4a)。尽管它们许多最富 Si 的变种是过铝的, 但大多是偏铝的。

2.5 太古代 TTG 片麻岩

英云闪长岩质、奥长花岗岩质和花岗闪长岩质(TTG)片麻岩是太古宙所特有的, 以高 Na_2O 低 K_2O 为特征。按 Frost 等的分类, 它们属镁质钙性和钙碱性花岗岩类, 少数属碱性(图 4b)。在这一方面, 它们不同于中生代科迪勒拉岩基的英云闪长质岩石, 后者倾向于完全落在钙性区。太古宙英云闪长岩和奥长花岗岩具低 $\text{K}_2\text{O} (< 3\%)$ 高 $\text{Na}_2\text{O} (> 4\%)$ 特征, 这与科迪勒拉岩基中的英云闪长岩相似, 但其 CaO 含量低于科迪勒拉的 TTG, 从而导

致太古宙 TTG 的 *MAL1* 指数高于科迪勒拉岩基的类似岩石。

2.6 拉克伦褶皱带花岗岩类

按 Frost 等的分类, 拉克伦褶皱带的 S 型花岗岩类, 成分上类似于 I 型。S 型和 I 型都以镁质花岗岩为主(图 4c), 但与北美西部中生代岩基一样, 相当多的富 SiO_2 花岗岩类是铁质花岗岩类。同时, I 型花岗岩类以钙碱性和钙性为主, 仅 1% 为碱钙性。二者的主要差别在于 S 型总是过铝(根据定义), 而 I 型大多为偏铝。拉克伦褶皱带的 A 型花岗岩类与其他地区的 A 型花岗岩类相似, 但它们的铁富集程度常常较低。

3 其他花岗岩类分类及其评述

3.1 IUGS 花岗岩类分类

IUGS 花岗岩类岩石学分类是依据石英、斜长石和碱性长石的实际含量进行的分类, 简称 QAP 矿物分类。它是花岗岩类岩石学分类的基础, 因为它牵涉到岩石的正确定名。Streckeisen(1976)给出了花岗岩、花岗岩类及其中各种岩石的精确矿物百分含量定义, 现在已为广大地质工作者沿用。所谓花岗岩(granite)指的是石英(Q)占 QAP 总量 20%~60%、斜长石(P)占 AP 总量 10%~65%的侵入岩, 它包括正长花岗岩(P 占 AP 总量的 10%~35%)和二长花岗岩(P 占 AP 总量的 35%~65%); 而花岗岩类(granitoid)指的是石英占 QAP 总量 20%~60%、碱性长石(A)和斜长石(P)以各种比例存在, 由碱性长石花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩(P 占 AP 的总量分别为 0~10%、10%~35%、35%~65%、65%~90%、90%~100%)构成的整个花岗岩族。

该分类针对长石含量和成分的差异, 解释了花岗岩较大的变化范围, 其优点在于, 对于大多数岩石来说, 容易在野外得到运用, 而且是廉价、简易和纯粹的非成因分类。IUGS 分类体系的主要缺陷是, 它忽略了影响长石含量之外的其他成分变化。因此, 具较大化学成分差异的镁铁质和长英质花岗岩类可能投影在相同的区间, 而且, 不能反映载有重要岩石学意义的次要矿物(如白云母)的存在与否。

3.2 以 Fe—Ti 氧化物为标志的成因分类

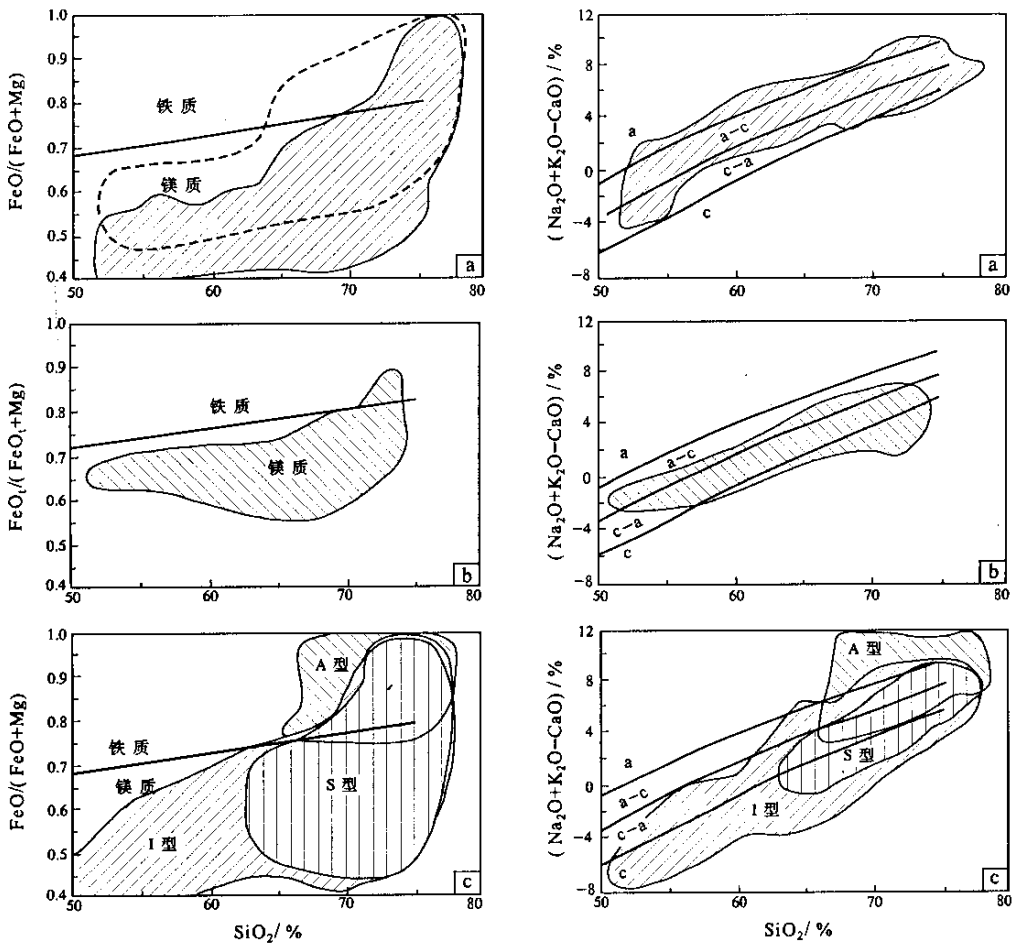


图 4 加里花岗岩类(a)、太古代 TTG 片麻岩(b)和拉克伦褶皱带花岗岩类(c)成分范围的 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ $[\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})]$ 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 对 SiO_2 图

Fig. 4 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ $[\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})]$ and $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ vs SiO_2 diagrams showing the composition ranges from Caledonian granitoids, Archean TTG greisses, and Lachlan Fold Belt granitoids

Ishihara (1977)^[10] 将花岗质岩石分为磁铁矿系列和钛铁矿系列。他认识到,含与钛铁矿共存的花岗质岩石和 Fe—Ti 氧化物仅为钛铁矿的花岗质岩石,在日本有着不同的空间分布,磁铁矿系列花岗岩类相对氧化,而钛铁矿系列花岗岩则相对还原,两种类型均伴生特有的矿床。

这一分类方案因其简单明了、与科迪勒拉型岩基所伴生的矿床密切相关(Ishihara, 1981),以及易于在广大区域运用航空物探测量(Gastil 等, 1990),故已广为人们接受。该方案并不属于严格意义上的地球化学分类,而是基于花岗质岩石结晶过程中逸出磁铁矿(或阻止其形成)的反应。在花岗质岩石中有三种过程可控制磁铁矿的稳定性:(1)变质沉积岩熔融过程中碳氧化所导致的还原

(Ishihara, 1977); (2)在还原性岩石中,与 Fe—Mg 硅酸盐反应所引起的磁铁矿消耗(Frost 等, 1988; Fuhrman 等, 1988; Frost 和 Limdsley, 1991); (3)在过碱性岩石中,形成钠质辉石和钠质角闪石所导致的磁铁矿消耗。Ishihara (1977) 的分类识别出第一种过程,但没有识别出后两种过程。因而它只适用于岩浆弧的花岗质岩石,而对后两种反应为主的较富碱质的花岗岩不太适用。因此,尽管钛铁矿系列和磁铁矿系列花岗质岩石的区分对科迪勒拉型花岗岩十分有效,但难以应用到其他大地构造环境下的花岗岩类中。

3.3 以地球化学为标志的成因分类(字母分类)
花岗质岩石分类中第一个现代地球化学方案是由 Chappell 和 White (1974)^[6] 在一篇摘要中提

出的,他们在澳大利亚东部拉克伦褶皱带识别出两种不同的花岗岩类。I 型是偏铝至弱过铝的,钠相对较高, SiO_2 含量(55%~77%)范围较宽,推测它们形成于一种镁铁质的变火成源岩。另一种类型强过铝,钾相对较高, SiO_2 含量(64%~77%)较高,由于推测它们形成于变沉积岩的部分熔融,故 Chappell 和 White 称之为 S 型花岗岩类。该分类立即被许多人接受,并得到广泛应用。它是基于花岗岩类源岩的成因易于区分这一假设,然而成分相似的花岗岩类可由多种多样的源岩的部分熔融形成(Miller,1985)。

在两分的基础上,Loiselle 和 Wones(1979)^[9] 也在一篇摘要中引入了另一项字母分类。他们识别出了一种独特的花岗岩类型,这种岩石相对富钾, $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 高,Zr 及其他高场强元素也高。由于这种花岗岩类极少变形,推测在最新变形事件后很久才侵位,因而被认为是“非造山的”。Loiselle 和 Wones(1979)根据碱度、“不含水”特征及推测的非造山大地构造背景,将这类花岗岩称为 A 型。此后,有许多论文讨论过 A 型花岗岩类的定义、成因及演化。尽管大多数研究者都认为这种花岗岩类与某种形式的大陆拉张有关,但是对其“非造山”成因的意义仍有较大争论。

这种用字母表示的成因分类的主要问题在于,它暗示了一种假设,即单个花岗质岩石来源简单,且这种来源易于根据岩石的化学成分判别。实际上,花岗岩类极少为单一来源,相反,它们往往是地幔来源的镁铁质熔体与含或不含变沉积岩组分的地壳岩石的熔体的混合物(John 和 Wooden,1990; Miller 等,1990)。这一点最近已从拉克伦褶皱带的 S 型和 I 型花岗岩类得到证实(Collins,1996)。而且,花岗质岩石的结晶分异导致较宽成分范围,以致 I 型和 S 型之间存在相当大的重叠(Hyndman,1984;Ague 和 Brimhall,1988)。此外,这一分类体系规则不甚统一,I、S、M、A 各类型花岗岩所表达的内涵也不完全相当。如 I 型 S 型主要表达花岗岩的源岩类型,M 型主要表达源区类型,而 A 型则由其非造山构造背景定义。

3.4 构造环境分类

自上世纪 60 年代板块构造学说诞生以来,关于板块构造与岩浆作用之间的关系,最先考虑的大概是火山岩和镁铁质侵入岩,因为它们大量分布于

板块边缘的洋脊和岛弧俯冲带,对花岗岩类岩石考虑不多。

1983 年,Pitcher 在一篇《花岗岩的类型与构造环境》论文中,提出了花岗岩类岩石的构造环境分类,他划分了五个类型:(1)大洋岛弧型(太平洋型),包括幔源分异的 M 型花岗岩;(2)陆缘岛弧型(安迪斯型),主要包括科迪勒拉 I 型英云闪长岩;(3)大陆斜碰撞型(海西型),包括 S 型花岗岩和混合岩;(4)闭合后隆起型(加里东型),包括 I 型黑云母花岗岩;(5)裂谷型,包括 A 型碱性花岗岩。

De la Roche 等(1980)^[11] 推出一种用变量 R_1 和 R_2 描述火成岩特征的方法。该方法将 Yoder 和 Tilley(1962)的玄武岩四面体压缩成为两维的 $R_1 - R_2$ 判别图,分别用阳离子函数 $R_1[4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})]$ 和 $R_2(\text{Al} + 2\text{Mg} + 6\text{Ca})$ 定义。用这一图解可区分出七种不同构造背景的花岗岩:(1)地幔斜长花岗岩(M 型);(2)消减的活动板块边缘花岗岩(科迪勒拉 I 型);(3)板块碰撞后隆起期花岗岩(加里东 I 型);(4)造山期后花岗岩;(5)非造山区碱性、强碱性花岗岩(A 型);(6)同碰撞花岗岩(S 型);(7)造山期后碱性花岗岩(A 型)。这种方法描述了 SiO_2 饱和、 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值和斜长石成分随分异作用的变化,从而成为镁铁质岩石的理想投影。然而,对花岗质岩石的适应性较差,因为钾长石和钠长石投在同一点上。这意味着该图不能用于区分 K/Na 比值不同的岩石,同时表明大多数花岗质岩石都只落在该图的小范围内(Bachelor 和 Bowden 1985)。这一方法由于变量 R_1 和 R_2 的岩石学意义直观上不太明显,在北美未得到广泛运用。

Pearce 等(1984)^[7] 介绍了一种表征花岗质岩石大地构造背景的地球化学方法,他使用了 600 多个分析数据作出了数种微量元素判别图,该图可从地球化学上区分出 4 种主要大地构造环境的花岗岩类:洋脊花岗岩、火山弧花岗岩、板内花岗岩和碰撞花岗岩,最好的判别图是 Nb 对 Y, Ta 对 Y, Rb 对 (Y + Nb) 和 Rb 对 (Y + Ta) 投影图。因为一般认为花岗岩类形成时的大地构造背景未被保存下来,故该方案得到了广泛应用,被认为是确定花岗质岩石大地构造背景的一种重要手段。

花岗岩类的微量元素成分是熔体的源岩和结晶历史的函数,大地构造背景是次要的控制因素。

例如,碰撞后花岗岩可来源于许多不同的源岩,取决于造山过程中增厚地壳的组成。这些花岗岩类也与镁铁质岩浆紧密相关(Liegeois 等,1998),镁铁质岩浆可与壳源的熔体组分混熔或混合。因此,这种大地构造类型的花岗岩化学成分受一系列源岩组合的影响,这就是它们的投影常常超出 Pearce 等(1984)所确定的范围的原因。

Maniar 和 Piccoli(1989)^[8]提出一个用分组图解判别花岗岩类构造环境的方法,可区分出 7 种构造环境的花岗岩类。其中造山构造环境 4 种:(1)岛弧花岗岩类(IAG),(2)大陆弧花岗岩类(CAG),(3)大陆碰撞花岗岩类(CCG),(4)后造山花岗岩类(POG);非造山构造环境 3 种:(1)与裂谷有关的花岗岩类(RRG),(2)与大陆抬升有关的花岗岩类(CEUG),(3)大洋斜长花岗岩(OP)。这个方法比较系统,但程序过分复杂,使用不广。

3.5 以矿物—地球化学特征为主的综合分类

90 年代,法国学者 Barbarin 一直致力于新的花岗岩类综合性分类的研究,于 1990 年和 1999 年分别提出了 2 个新的综合性分类方案(Barbarin, 1990, 1999)。第 1 个分类方案由于分类准则复杂、类型间缺乏明确的界线,每一类型都用首写字母命名,并且花岗岩类型与地球动力学环境的联系尚未充分研究等原因,未得到广泛应用。第 2 个分类方案考虑了花岗岩类的主要矿物组合、QAP 岩石类型和野外关系以及重要的化学和同位素特征,并将其与 20 种常见的花岗岩类成因分类进行了对比,发现二者之间在成因上有许多相似之处,即常见的 20 种花岗岩类成因分类的共同点,都是力图将其分类与其来源挂钩,分为壳源、幔源和壳—幔混合源的花岗岩。虽然有些岩石学家(如查佩尔和怀特)似乎不同意有除地壳之外的成因,但他们所划分的各类型花岗岩,在矿物组合、野外关系、岩石特征、化学和同位素组成上却与壳源、幔源和混合源作用的花岗岩类极为相似。

如同 20 种成因分类一样,Barbarin 的分类体系也可与来源区建立类似的联系,分为壳源、幔源和混合源花岗岩类。最后他又吸收 80 年代以来化学元素与构造环境关系的研究成果,建立了该分类体系与地球动力学环境的联系:两种过铝花岗岩类(MPG、CPG)都属壳源,产于大陆碰撞构造环境;拉斑玄武质、碱性和过碱性的花岗岩类(RTG、

PAG)都属幔源,产于大洋扩张或大陆穹隆和裂谷的构造环境;两类钙碱性花岗岩(ACG、KCG)都属壳—幔混合源,其中 ACG 主要产于俯冲带,而 KCG 情况较为复杂,它存在于各种地球动力学环境中,形成于碰撞事件中分隔顶峰时期的松弛阶段,或形成于由压性体制向张性体制的过渡时期。

该方案具有直接将成分与矿物学联系起来的优点,但缺点在于将成分十分广泛的花岗岩类只压缩成 6 种类型。从目前国外文献来看,仍未得到广泛运用。

5 结语

本文详细介绍了 Frost 等(2001)的花岗质岩石新地球化学分类,并对 IUGS 花岗岩矿物分类,以 Fe—Ti 氧化物为标志的成因分类,以地球化学为标志的成因分类、花岗岩构造环境分类和以矿物—地球化学特征为主的综合分类进行了简要评述。我们认为,目前提出的各种花岗岩分类都各有优点,也各有其局限性。在所有的分类系统中,QAP 矿物分类是基础,因为它牵涉到花岗岩类岩石的正确定名,依赖于显微镜下的矿物含量统计和矿物学工作。而在开展花岗岩类课题研究的过程中,这一步骤不可省略。如果不进行这一基础性研究,一上来就选样作化学分析,然后根据几张现存的图解来确定花岗岩的成因和构造环境等等,显然是将花岗岩的研究过程过于简单化,最终往往得不到正确的认识,更谈不上提出精辟的见解。

当然,花岗岩研究还有一个更基础性的工作,即详细的野外地质调查,查明花岗岩类岩体相互之间以及与其他地质体之间的关系,这已不在本文讨论的范围之内。

参考文献:

- [1] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999, 46: 606—626.
- [2] Frost B R, et al. A Geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42. 2033—2048.
- [3] Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins [J]. *American Journal of Science*, 1970, 274, 321—335.
- [4] Peacock M A. Classification of igneous rocks series[J].

Journal of Geology, 1931,39,54—67.

[5]Shand S J. The eruptive rocks[M]. 2nd edn. New York: John Wiley, 1943. 444.

[6]Chappell B W, White, A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173—174.

[7]Pearce J A, et al. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956—983.

[8]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101, 635—643.

[9]Loiselle M C, Wones D S. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America, 1979, 11: 468.

[10]Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. Mining Geology, 1977, 27: 295—305.

[11]De la Roche H, et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1 - R_2 diagrams and major element analysis—its relationships with current nomenclature [J]. Chemical Geology, 1980, 29, 183—210.

Recommendation for the new geochemical classification scheme of granitic rocks and review for the relevant subjects

TU Shao-xiong, WANG Gui-hua
(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, China)

Abstract: On the basis of the analytic data of the invariable elements for granitic rocks, Frost et al. (2001) divided the spectrum of granitoid compositions into 16 compositional groups or 16 granitoid types. They used 3 chemical parameters of the rocks including the $FeO/(FeO+MgO)$ or $FeO_t/(FeO_t+MgO)$ ratio, the modified alkali-lime index ($MALI$) and the aluminum saturation index (ASI). The classification is a non-genetic and non-tectonic geochemical scheme and can supply some knowledge of the sources of the magma or tectonic environment for a suite that incorporates the best qualities of the previous schemes. This paper makes an exhaustive introduction for the classification scheme and gives a review for the relevant subjects.

Key words: granitic rock; geochemical classification; review