

A 型花岗岩的微量元素地球化学

苏玉平^{1,2}, 唐红峰¹

1. 中国科学院 地球化学研究所 地球深部物质与流体作用地球化学研究室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

摘 要: 本文总结和评述了 A 型花岗岩典型的微量元素特征, 如富集 Ga、稀土元素(除 Eu 外)和高场强元素, 亏损 Ba、Sr 和明显的 Eu 负异常。分别讨论了影响微量元素特征的多种制约因素, 主要包括源区性质、岩浆的物理化学条件、岩浆作用过程和络合作用。通过对比世界范围内几个地区相伴生的碱性 A 型花岗岩和铝质 A 型花岗岩的微量元素地球化学特征, 发现前者 Ga、F 含量更高, 而轻重稀土比值小, Eu、Ba、Sr 等元素含量更低, 显示了前者的岩浆分异作用更强, 同时说明了碱性 A 型花岗岩可以由与之伴生的铝质 A 型花岗岩分异而来。

关 键 词: A 型花岗岩; 微量元素; 铝质 A 型花岗岩; 碱性 A 型花岗岩

中图分类号: P595; P588.12⁺ **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2005)03-0245-07

A 型花岗岩自 1979 年由 Loiselle 和 Wones^[1] 提出以来, 一直受到地质学家的高度重视。它以贫水、碱性和非造山为特征而有别于其他类型的花岗岩; 但目前所限定的 A 型花岗岩与原来的概念已有很大不同, 包括非造山和造山两种环境的多种岩石组合^[2]。微量元素作为有效揭示岩石形成过程、判别大地构造环境的重要工具, 已成为 A 型花岗岩研究中的关键内容, 前人对此进行了一定的研究。本文总结了国内外 A 型花岗岩微量元素的典型特征, 阐述了元素富集与亏损的主要制约因素, 着重对比和讨论了 A 型花岗岩中两个亚类(铝质 A 型花岗岩与碱性 A 型花岗岩)的微量元素特征及其差异。

1 A 型花岗岩的微量元素一般特征 与主要制约因素

A 型花岗岩是一类特殊的岩石, 其岩石学、矿物学和地球化学均有很显著的特征。它的岩石类型不仅包括碱长花岗岩与碱性花岗岩, 甚至也包括偏铝质和过铝质花岗岩^[2,3]。矿物学上以碱性长石和石英为其主要矿物相, 次要矿物以霓石、钠铁闪石等碱性暗色镁铁矿物为特征。A 型花岗岩的主量元素以高硅富碱低钙为特征。微量元素最显著的特征是选择性富集与亏损。其微量元素特征主要有以下几个方面: 1) Ga 相对富集。Whalen 等^[4]正是根据岩石

Ga/Al 值的大量统计研究, 提出了 A 型花岗岩区别于其他类型(M、I、S 型)花岗岩的化学特征, 成为划分 A 型花岗岩的重要标准; 2) 稀土元素含量较高, 是其他类型花岗岩的数倍甚至几十倍, 且轻重稀土元素分馏明显, 具明显的铕负异常, 稀土元素配分模式呈典型的右倾“V”字型; 3) 高场强元素 Zr、Hf、Nb 的含量普遍偏高; 4) 大离子亲石元素 Rb、U、Th 含量高, 而 Ba、Sr 含量很低; 5) F 的含量较高, 大多高于 1000 $\mu\text{g/g}$; 6) 过渡元素 Cr、Ni 表现为强烈亏损, 而 Cu、Zn 则相对富集。此外, 钨钼族元素的含量也较高, 在一定条件下可以形成矿床, 如尼日利亚 Jos 高原和我国苏州的 Sn-W-Nb-Zn 矿床^[5]。

Collins 等^[6]从地球化学角度讨论了 A 型花岗岩质熔体的本质, 还有学者用实验岩石学方法证实了源岩化学成分^[7]和成岩条件^[8,9]对 A 型花岗岩的矿物学和岩石化学成分的影响。表明 A 型花岗岩的微量元素特征受多种因素的制约。根据前人的研究, 可以将这些因素归纳为源区性质、岩浆的物理化学条件、岩浆作用过程和络合作用等四个方面。

(1) 源区性质: 岩浆的微量元素定量模型揭示, 部分熔融成因岩浆的微量元素特征与源区岩石的微量元素组成密切相关。A 型花岗岩的微量元素地球化学特征与源岩的关系也是如此, Bogaerts 等^[10]研究挪威南部的 A 型花岗岩时, 发现 Tranevag 岩体

收稿日期: 2005-05-19 收到, 05-31 改回

基金项目: 中国科学院西部之光计划资助项目(2002 年度); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409805)

第一作者简介: 苏玉平(1981—), 男, 硕士研究生, 从事岩石地球化学研究。

与附近的 Red Granite 岩体的微量元素特征不同, 后者的 LREE、Th、Sr 及 Rb 的含量比前者的高。他们认为这一差异是两者源岩成分的不同所致。尽管到目前为止对 A 型花岗岩的源岩还没有一个统一的认识, 但越来越多的研究显示 A 型花岗岩很可能主要起源于中下地壳的高钾、贫水(或含少量水)的岩石^[6, 11, 12]。在这种条件下角闪石、云母等含 F 或 Cl 的矿物的脱水作用, 可形成辉石和熔体: 黑云母+角闪石+石英+斜长石 = 斜方辉石+单斜辉石+钾长石+熔体^[13]。源区的这种特性决定了 A 型花岗岩有较高的 F 含量。

(2) 岩浆的物理化学条件: Landenberger 等^[11]的研究显示, 澳大利亚东部的 I 型、A 型花岗岩是同源的, 而不同的成岩条件造成了两者成分的差异。Dall'Agno 等^[9]也指出 A 型花岗质岩浆体系的分异过程很大程度上受 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 f_{O_2} 的影响。微量元素地质温度、压力计的合理运用^[12, 14]更表明了岩浆的温度、压力对岩石化学成分的影响。由此可见, 岩浆的物理化学条件(温度、压力和氧逸度等)对微量元素的作用不容忽视。A 型花岗质岩浆一般无残留岩, 表明其形成的温度较高(约 900°C)^[15]。在岩浆的高温作用下, 富含稀土元素的副矿物的溶解度变大^[16]。虽然副矿物仅占花岗岩的 1% 左右或更少, 但它对全岩稀土元素含量的贡献可达 40%~60%, 因此源岩中少量副矿物的熔融无疑可使 A 型花岗岩富集稀土元素。从压力的角度看, 形成 A 型花岗岩的岩浆侵位浅, 无论哪一亚类 A 型花岗岩都可能有晶洞构造, 晶洞中填充结晶了钠铁闪石、霓石或石榴子石、白云母、石英与钠长石等, 因此它侵位深度皆小, 一般属高侵位岩体。Patino Douce^[17]的实验表明, 地壳长英质岩石在低压条件下脱水部分熔融产生的 A 型花岗质岩浆比高压条件下形成的岩浆更符合 A 型花岗岩的地球化学特征。他还指出熔融的压力大小与源岩一样也会影响熔体的成分。至于氧逸度, 尽管 Anderson 和 Bender^[18]发现了氧化环境的 A 型花岗岩, 但磁铁矿+石英+榍石的矿物组合说明其形成的氧逸度位于 NNO 附近, 大量的实例和实验研究也证实了这一结论^[19, 20]。这种低的氧逸度无疑有益于 Zn、Fe、Cu 的快速沉淀, 从而导致这些元素在 A 型花岗岩中的相对富集。

(3) 岩浆的结晶分异作用: A 型花岗岩的酸度变化范围大, Eu 的负异常明显, Rb/Sr 与 Rb/Ba 值大, 岩石化学成分在哈克图解、双变量微量元素图解

及标准化曲线中均表现为连续有规律的变化趋势, 这些特征反映了岩浆曾经历过明显的结晶分异作用。Klimm 等^[21]的实验研究表明, 硅含量高的 A 型花岗岩(样品 AB422)可以由硅含量略低的 A 型花岗岩岩浆(样品 AB412)发生 4.7% 的斜方辉石和 8.5% 的斜长石的结晶分异作用而形成。King 等^[22]指出, 斜长石+镁铁矿物的分异作用造成了澳大利亚 Lachlan 褶皱带中 Wangrah A 型花岗岩岩体成分的差异。Han 等^[23]及 Turner 等^[24]认为地幔玄武质岩浆通过高度结晶分异作用可直接衍生出 A 型花岗岩。对于 A 型花岗质岩浆体系来说, 长石往往是分离结晶的主要矿物相, 斜长石的不断分离结晶作用可使残余岩浆中的 Sr、Eu 不断亏损。

(4) 络合作用: A 型花岗岩的高 F 含量为高场强元素的络合反应提供了良好的条件, 因为 F 打破了硅酸盐熔体原有的结构模式, 且 F 体积小, 电负性大, 能以共价键形式与其他元素络合成高配位的复杂络合物, 如 MoF_6 、 GaF_3 、 LaOF 等。在有足够平衡离子(Na^+ 、 K^+)存在的情况下, 一方面这些络合物变得更加稳定, 另一方面熔体中还可以形成硅酸盐聚合物, 如 $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2 = (\text{Na}, \text{K})_2\text{ZrSiO}_5$ 。因此, 在高 F 高碱的 A 型花岗质岩浆中, 高场强元素会随熔体一起迁移, 而不易以独立的矿物相结晶析出。在岩浆过程的较晚阶段, 由于物理化学条件的改变, 如温度下降、pH 值增大, 这些络合物将不再稳定而分解, 造成高场强元素的富集。

综上所述, A 型花岗岩中部分大离子亲石元素的富集首先与源区有关, 而岩浆的物理化学条件、岩浆作用过程和流体的络合作用也是重要的制约因素, Eu、Sr 及 Ba 等的亏损与岩浆分异作用密切相关, 而高场强元素的富集则主要与 F 的络合反应有关。

2 两类 A 型花岗岩的对比

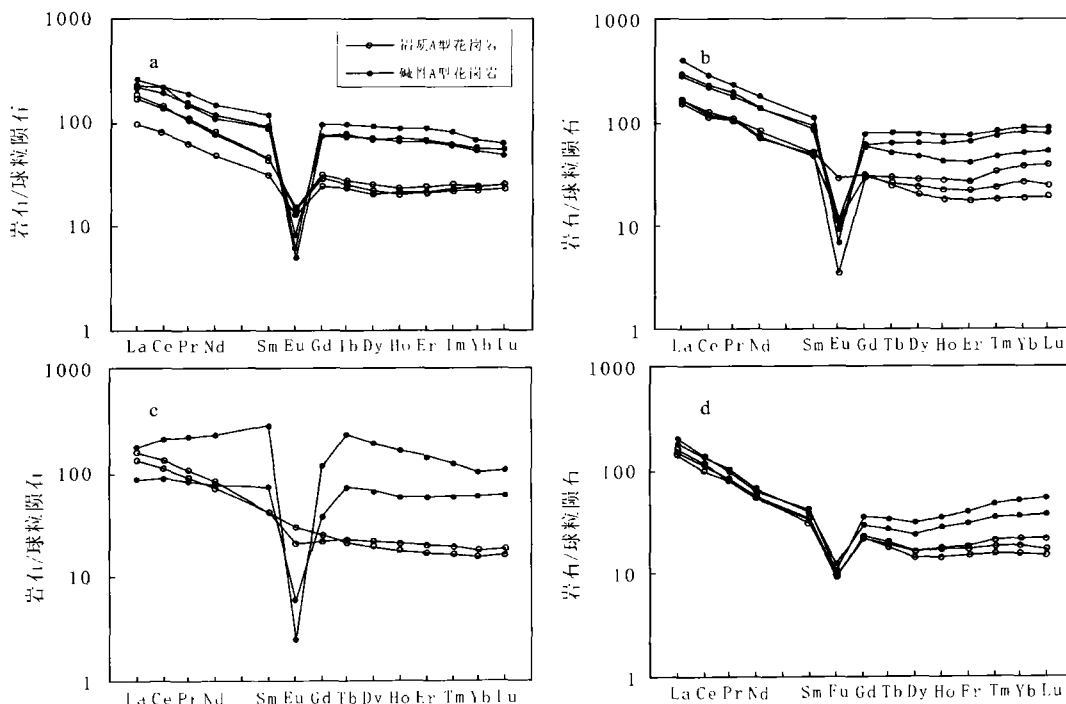
Eby^[25]根据地球化学特征将 A 型花岗岩分为大陆裂谷或板内环境的 A1 型和与陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用有关的 A2 型; Eby^[26]和 Hong 等^[27]根据构造环境将其分为非造山型(AA)和后造山型(PA); 许保良等^[28]根据物质来源将其分为富集型和亏损型, 他还根据岩石学特征将其分为 7 个亚类^[2]。King 等^[8]发现澳大利亚 Lachlan 褶皱带中的岩体不同于传统意义上的 A 型花岗岩, 并由此提出了铝质 A 型花岗岩的概念, 以区别于碱性-过碱性 A

型花岗岩。此后,对铝质 A 型花岗岩的研究得到了明显的加强。事实上,Loisselle 与 Wones^[7]于 1979 年就提到了铝质 A 型花岗岩,但当时没能引起人们的注意。实际上,对于贫钙的 A 型花岗岩,岩石中的 Al₂O₃ 和全碱(K₂O+Na₂O)含量稍有变化,岩石既可能是铝质的,也可能是碱性的。因此,铝质 A 型花岗岩这一提法是合理的。

碱性 A 型花岗岩和铝质 A 型花岗岩在岩石学、矿物学和岩石化学成分上均有明显差异。前者以碱性花岗岩为主,以发育霓石、钠闪石等碱性暗色矿物为标志;后者以花岗闪长岩、碱性长石花岗岩为主,暗色矿物主要是一般的角闪石与黑云母等^[12,23,29],而且往往含石榴石和白云母。在主量元素上,前者富碱,后者相对富铝,二者的(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃值明显不同。不少学者把 NK/A[(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃,分子数比]=0.9 作为划分碱性和偏碱性花岗岩的界限,而 Liegeois 和 Black^[30]认为 NK/A>0.87 时即为碱性花岗岩。为了比较两者的微量元素特征,笔者选取前人研究的中国东北、新疆乌伦古河、澳大利亚东部、挪威南部及福建沿海等几个典型

地区作为实例^[10~12,23,29,31,32]。其中,每一地区都有两个亚类产出。通过比较发现,二者的微量元素特征主要有以下差异:

(1)都显示出典型 A 型花岗岩的稀土配分模式,但相对铝质花岗岩而言,碱性花岗岩的负铕异常更明显,轻重稀土比值更小,稀土元素尤其是重稀土元素的含量更高,其球粒陨石标准化的配分模式位于同一地区铝质 A 型花岗岩的上方(图 1),显示了 A 型花岗岩的稀土配分模式受碱性指数的影响。造成这种现象的原因一方面可能是岩石分异程度的不同:岩石分异程度越高,轻重稀土比值越小^[33];另一方面,副矿物的堆积与分异发挥了重要作用。在碱性 A 型花岗岩岩浆中,富含重稀土的副矿物如锆石、磷钇矿在岩浆晚期能够稳定存在^[6],且晚期形成的含 Fe、Mn 矿物往往富集重稀土,更为重要的是富含轻稀土的副矿物如榍石、独居石在岩浆演化过程中发生了一定程度的分异^[20,34]。Landenberger 等^[11]指出,褐帘石 0.02%的分异就可以使岩石的轻稀土明显下降,轻重稀土比值减小。



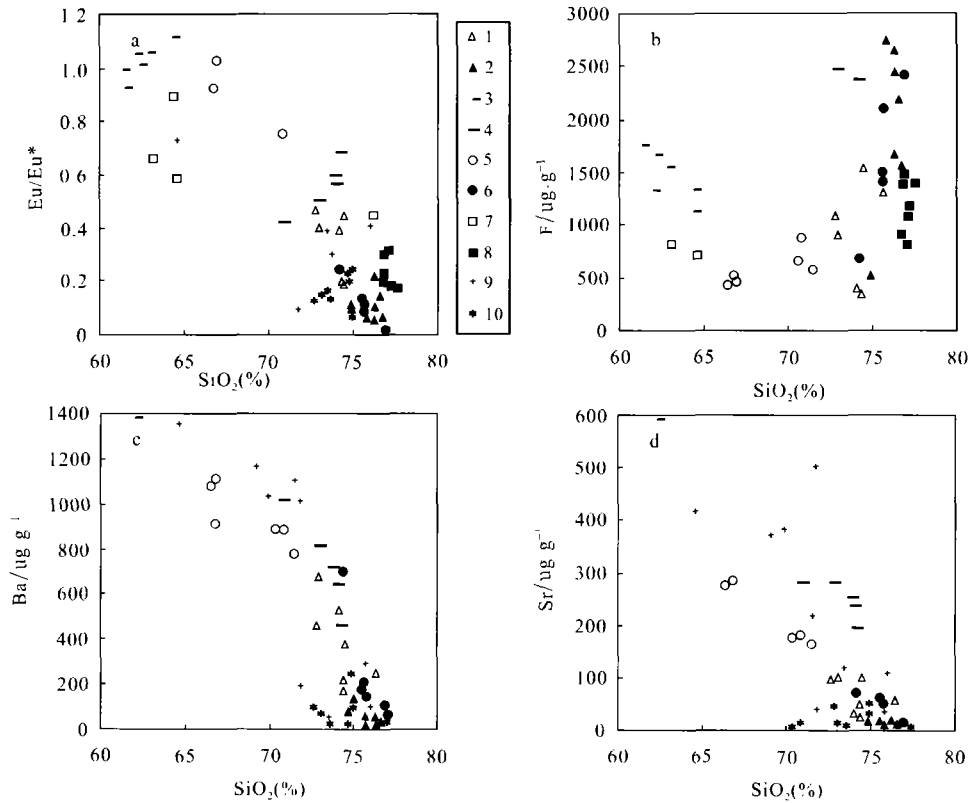
a. 中国东北^[29]; b. 新疆^[23]; c. 澳大利亚 Chaelundi 岩体^[11]; d. 福建沿海^[31]

图 1 几个地区 A 型花岗岩的稀土元素配分模式图

Fig. 1 Chondrite-normalized REE patterns of the A-type granites from several areas

(2)Ba、Sr、Eu 等元素的含量及 NK/A 值有明显差异。由图 2a、c、d 可知,上述几个典型地区 A 性花岗岩的 SiO₂ 与 Eu/Eu*、Ba、Sr 均呈明显的负相关关系,而且碱性 A 型花岗岩较与其伴生的铝质 A 型花岗岩有更高的 SiO₂ 含量,更明显的负铕异常和更低的 Ba、Sr 含量。这些特征显示了碱性 A 型

花岗岩的岩浆结晶分异作用更强。邱检生等^[31]通过对比研究这两个 A 型花岗岩亚类的 Fe₂O₃(%)、R₁[R₁ = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)]、R₂(R₂ = Al + 2Mg + 6Ca),发现它们之间的较大差异,也从主量元素上揭示了二者存在岩浆分异演化的关系。



1, 2 中国东北^[29]; 3, 4 挪威南部^[2]; 5, 6 澳大利亚 Chaelundi 岩体^[1]; 7, 8- 福州岩体^[32]; 9, 10 新疆^[27]; 奇数序号表示铝质 A 型花岗岩, 偶数序号表示碱性 A 型花岗岩
图 2 几个地区 A 型花岗岩的 Eu/Eu* - SiO₂ (a), F - SiO₂ (b), Ba - SiO₂ (c), Sr - SiO₂ (d) 协变图

Fig. 2 Plots of Eu/Eu* (a), F (b), Ba (c) and Sr (d) versus SiO₂ for the A-type granites from several areas

(3)碱性 A 型花岗岩高场强元素及 F 的含量较铝质 A 型花岗岩的要高。如图 2b 所示, 铝质 A 型花岗岩的 F 含量大多低于或近于 1000 μg/g, 碱性花岗岩则刚好相反。由于碱性 A 型花岗岩 F 浓度高, Ga、Zr、Nb 等元素更容易形成稳定络合物而随岩浆一起迁移, 并在岩浆过程的晚阶段进一步富集。Watson^[35]用实验证明这些元素在碱性熔体中的溶解度大于在铝质熔体中的溶解度, 这也可能是导致它们在两个亚类中含量不同的原因之一。F 在两个亚类中的差异与卢欣祥^[36]的认识相一致, 他把 F 含量以 1000 μg/g 作为碱性花岗岩和钙碱性花岗岩的分界。尽管如此, F 含量的差异不能说明同一地区

产出的两个亚类源区的不同, 因为碱性熔体 F 浓度高并不要求源岩有异常高的 F 含量。Clements 等^[15]计算发现, F 含量低的早期岩浆通过分异演化也会产生高 F 晚期熔体。因此, A 型花岗岩中 F 浓度的高低也与岩浆分异演化的途径和程度有关。

由上可知, 两个亚类的微量元素特征差异较大, 其原因是多方面的, 如岩浆中 F、Cl 含量的差异^[6, 32]、两者源区的不同^[8]等。一些研究^[11, 29, 31]显示, 两者的源区可以没有明显差别, 而岩浆的结晶分异作用可以直接导致其 F、Cl 含量的差异。因此, 某些地区碱性 A 型花岗岩与铝质 A 型花岗岩微量元素特征的差异可能主要与岩浆分异演化的程度密

切相关,特别是当其岩浆具同源关系的 A 型花岗岩更应该如此。一般碱性花岗岩的岩浆分异作用更强,形成更晚,因此碱性花岗岩可以由与之伴生且同源的铝质花岗岩发生岩浆分异作用而成。这一演化过程不仅能很好地解释 A 型花岗岩两个亚类的微量元素差异,而且与我国很多 A 型花岗岩(如雾灵山^[19]、崂山^[37])岩浆演化的趋势(从钙碱性到碱性-过碱性)相一致。此外,以下几个事实也可以证明这一演化关系的合理性:1)内蒙古中心带、浙闽沿海地区分布的 A 型花岗岩侵入的时间先后顺序为:花岗闪长岩、二长花岗岩→晶洞含钠铁闪石碱性花岗岩^[27],表明岩石碱性程度越高,形成越晚^[27]。2) A 型花岗岩常与 I 型花岗岩伴生(如崂山、漳州、苏州等 I-A 型复合岩体),而且一般认为 I 型形成稍早, A 型形成偏晚。随着对 A 型花岗岩研究的深入,有些铝质 A 型花岗岩可能被前人归入 I 型花岗岩(如广东佛冈岩体^[33]),这也从时间上说明了碱性花岗岩比铝质花岗岩形成晚。3) 铝质 A 型花岗岩大多形成于造山期后的环境^[33-38],而碱性 A 型花岗岩主要形成于板内非造山的构造环境,标志造山作用的结束,这从区域构造演化上也说明了碱性 A 型花岗岩可以由铝质花岗岩分异演化而来。

许保良等^[2]将碱性 A 型花岗岩与铝质 A 型花岗岩相伴生作为一个独立的亚类来考虑,那么为什么有的地区以铝质花岗岩为主(如 Lachlan 褶皱带^[8]与福建沿海),有的又以碱性花岗岩占优势(如新疆北部),有的地区又只产出一种类型的 A 型花岗岩,为什么中国东部的 A 型花岗岩在郯庐断裂的西侧以碱性为主,东侧又以铝质为主? 这一系列问题值得探讨。总之,铝质 A 型花岗岩的提出表明了对 A 型花岗岩认识的深入,也为今后的研究提出了新的课题。因为它使 A 型花岗岩的范围更加广泛,使其与分异的 I 或 S 型花岗岩更加难以区分。因此,加强对铝质 A 型花岗岩的微量元素研究十分必要,有益于阐明铝质 A 型花岗岩与碱性 A 型花岗岩的关系,深化对铝质 A 型花岗岩成因及构造意义的认识。

参考文献 (References):

[1] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geol. Soc. Am., 1979, 11: 468.
 [2] 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.
 Xu Baoliang, Yan Guohan, Zhangchen, Li Zhitong, He

Zhongfu. Petrological subdivision and source material of A-type granites[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3): 113-124. (in Chinese with English abstract)
 [3] 袁忠信. 关于 A 型花岗岩命名问题的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 293-296.
 Yuan Zhongxin. A discussion on the naming of A-type granite [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 293-296. (in Chinese with English abstract)
 [4] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1987, 95: 407-419.
 [5] 汪建明, 杨年强, 李康强, 丁桂春. 苏州 A 型花岗岩的岩浆分异与成矿作用[J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 33-43
 Wang Jianming, Yang Nianqiang, Li Kangqiang, Ding Guichun. The metallogenesis and magmatic differentiation of Suzhou A-type granite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(1): 33-43. (in Chinese with English abstract)
 [6] Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1982, 80: 189-200.
 [7] Creaser R A, Price R C, Wormland R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source modal [J]. Geology, 1991, 19: 163-166.
 [8] King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. J. Petrol., 1997, 38: 371-391.
 [9] Dall' Agnol R, Scaillet B, Pichavant M. An experimental study of a Lower Proterozoic A-type granite from the eastern Amazonian craton, Brazil[J]. J. Petrol., 1999, 40: 1673-1698.
 [10] Bogaerts M, Scaillet B, Liegeois J P, Auwera J V. 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, 2003, 124: 149-184.
 [11] Landenberger B, Collins W J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, eastern Australia[J]. J. Petrology, 1996, 37(1): 145-170.
 [12] Auwera J V, Bogaerts M, Liegeois J P, Demaiffe D, Wilmart E, Bolle O, Duchesne J C. 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, 2003, 124: 107-148.
 [13] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1991, 107: 41-59.
 [14] Jung S, Hoernes S, Mezger K. Geochronology and petrogenesis of Pan-African, syn-tectonic, S-type and post-tectonic A-

- type granite (Namibia) products of melting of crustal sources, fractional crystallization and wall rock entrainment [J]. *Lithos*, 2000, 50: 259-287.
- [15] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. *American Mineralogist*, 1986, 71: 317-324.
- [16] 陈培荣, 章邦桐. A型花岗岩类研究综述[J]. *华南地质与矿产*, 1994, 4: 9-14.
Chen Peirong, Zhang Bangtong. A review on A-type granites [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1994, 4: 9-14. (in Chinese with English abstract)
- [17] Patino Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. *Geology*, 1997, 25: 743-746.
- [18] Anderson J L, Bender E E. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the Southwestern United States of America[J]. *Lithos*, 1989, 23: 19-52.
- [19] 许保良, 阎国翰, 黄福生, 赵希强. 雾灵山 A型花岗岩系的矿物学特征及成因意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1994, 30(6): 703-716.
Xu Baoliang, Yan Guohan, Huang Fusheng, Zhao Xiqiang. Rock-forming minerals and magmatic history of evolution and crystallization of Wulingshan A-type granitic complex[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1994, 30(6): 703-716. (in Chinese with English abstract)
- [20] Jung S, Mezger K, Hoernes S. Petrology and geochemistry of syn-to post-collisional metaluminous A-type granites—A major and trace element and Nd-Sr-Pb-O isotope study from the Proterozoic Damara Belt, Namibia[J]. *Lithos*, 1998, 45: 147-175.
- [21] Klimn K, Holtz F, Johannes W, King P L. Fractionation of metaluminous A-type granites: An experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia[J]. *Precambrian Research*, 2003, 124: 327-341.
- [22] 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]. *Aust. J. Earth Sci.*, 2001, 48: 501-514.
- [23] Han B F, Wang S G, Jahn B M, Hong D W, Kagami H, Sun Y L. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Perozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138: 135-159.
- [24] Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. *Lithos*, 1992, 28: 151-179.
- [25] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [26] 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.
- [27] Hong D W, Wang S G, Han B F, Jin M Y. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere [J]. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, 1996, 13: 13-27.
- [28] 许保良, 王式光, 韩宝福, 阎国翰, 何中甫. 富集性和亏损性 A型花岗岩——以华北燕山和新疆乌伦古河地区岩石为例 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(2-3): 352-362.
Xu Baoliang, Wang Shiguang, Han Baofu, Yan Guohan, He Zhongfu. A-type granites with the character of enrichment and loss with particular reference to both suites of the Yanshan, North China and Wulunguhe, northwest China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(2-3): 352-362. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. A type granites in northeastern China age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 143-173.
- [30] Luegeos J P, Black R. Alkaline magmatism subsequent to collision in the Pan-African belt of the Adrar des Hôras (Mali) [A]. Fitton J G, Upton B G J., eds. *Alkaline igneous rocks* [M]. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 1987, 30: 381-401.
- [31] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, McInnes B I A. 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.
Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi Kanisawa, Brent I A McInnes. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province [J]. *Geochimica*, 2000, 29(4): 313-321. (in Chinese with English abstract)
- [32] 吴郭泉. 福州复式岩体的组成及演化 [J]. *岩石学报*, 1991, (2): 81-88.
Wu Guoquan. The compositions and evolution of Fuzhou composite intrusion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991, 2: 81-88. (in Chinese with English abstract)
- [33] 包志伟, 赵振华. 佛冈铝质 A型花岗岩的地球化学及其形成环境初探 [J]. *地质地球化学*, 2003, 31(1): 52-61.
Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China—A preliminary study [J]. *Geology-Geochemistry*, 2003, 31(1): 52-61. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽两条 A型花岗岩带 [J]. *岩石学报*, 1994, 10(4): 357-369.
Xing Fengming, Xu Xiang. Two A-type granite belts from Anhui [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(4): 357-369. (in Chinese with English abstract)
- [35] Watson E B. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental data and applications to trace element geochemistry [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 70: 407-419
- [36] 卢欣祥. 龙王石童 A型花岗岩地质矿化特征 [J]. *岩石学报*,

1989, 2(1): 67-77.

[37] 卢宁宁. The geological characteristics of Longwangzhuang A-type granite and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 1989, 2(1): 67-77. (in Chinese with English abstract)

[37] 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. 高校地质学报, 1997, 3(1): 1-15.

Zhao Guangtao, Wang Dezi, Cao Qinchen. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province[J]. Geol. J. China Univ., 1997, 3(1): 1-15. (in Chinese with

English abstract)

[38] 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(3): 289-298.

Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, Cai Bicong, Ling Hongfei, Ni Qisheng. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibeil A-type granitic intrusives in South Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(3): 289-298. (in Chinese with English abstract)

Trace Element Geochemistry of A-Type Granites

SU Yu-ping^{1,2}, TANG Hong-feng¹

1. Laboratory for Study of Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Typical characteristics of trace element geochemistry of A-type granites are reviewed and summarized in this paper. They include the enrichment of Ga, REE (except Eu) and high-field-strength elements (such as Zr, Nb), the depletion of Ba and Sr, and the obvious negative Eu anomaly. Several factors controlling features of trace elements are discussed respectively. They include the character of source materials, physical-chemical conditions of the magmas, magmatic processes, and complexation in magmas. The comparison of trace element geochemical characteristics of alkaline A-type granites and those of the associated aluminous A-type granites in several areas show that the alkaline A-type granites has higher Ga and F concentrations, smaller LREE/HREE ratios, lower Eu, Ba, Sr concentrations than those of the associated aluminous A-type granites. These features imply that the alkaline A-type granitic magma was more strongly differentiated than the aluminous A-type granitic magma. This could imply that the alkaline A-type granitic magma could be derived through crystal fractionation from the aluminous A-type granitic magma.

Key words: A-type granite; trace element; aluminous A-type granite; alkaline A-type granite