

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2015.02.004

华南印支期铝质 A 型花岗岩的判别、成因及构造环境

沈 滔¹, 陈正乐^{1,2}, 韩凤彬², 詹礼贵¹

SHEN Tao¹, CHEN Zheng-Le^{1,2}, HAN Feng-Bin², ZHAN Li-Gui¹

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

(1. School of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

摘要:传统意义的 A 型花岗岩在化学成分上可分为碱性 A 型花岗岩(简称 AAG)和铝质 A 型花岗岩(简称 ALAG)两类, ALAG 为 A 型花岗岩的一个亚类。随着华南地区花岗岩研究的不断深入, 印支期铝质 A 型花岗岩越来越被关注。本文系统阐述了 ALAG 岩相学、矿物学、地球化学特征及其判别方式, 分析了华南印支期 ALAG 的物质来源、成因及形成构造环境。发现其来源于华夏地块古老变质沉积岩不同程度的部分熔融, 在其形成过程中有可能混染当时的基性地幔组分; 构造环境主要受控于古太平洋板块的俯冲作用, 形成于后造山阶段, 但应也受到了印支地块与华南陆块的后碰撞过程的影响。

关键词:铝质 A 型花岗岩; 判别; 岩石成因; 构造环境; 印支期; 华南

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2015)02-151-07

Shen T, Chen Z L, Han F B and Zhan L G. Discrimination, Genesis and Tectonic Setting of Indosinian Aluminum A-type Granite in South China. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(2):151–157.

Abstract: The traditional meaning of the A-type granite on the chemical composition can be divided into alkaline A-type granite (AAG) and aluminum A-type granite (ALAG). Aluminum A-type granite (ALAG) belongs to a subtype of A-type granitoids. Along with the deep-going research of indosinian aluminum A-type granite in southern China, it is becoming more and more attention. The unique mineralogy feature and geochemical characteristics of ALAG is summarized to discuss the method for discriminate the ALAG from other type granitoid. It then analyzed material source, petrogenesis and tectonic settings of the Indosinian ALAG in South China. It is shown that indosinian aluminum A-type granite in southern China from different degree of partial melting of huaxia plot old metamorphic sedimentary rocks, possible contaminated the basic components of mantle in the process of its formation; tectonic setting is mainly controlled by the subduction of the ancient Pacific plate, formed at post orogenic stage, but should also be impact collision process for the indosinian block and South China continental block.

Key words: aluminum A-type granite; discrimination; petrogenesis; tectonic setting; Indosinian; South China

自 1979 年 Loiselle 和 Wones^[1]提出将具“3A”特 (Anorogenic)的花岗岩定义为 A 型花岗岩后, 国内征, 即碱性 (Alkaline)、无水 (Anhydrous)、非造山 外学者对 A 型花岗岩进行了大量的研究和讨论。

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-03-22

基金项目: 国家专项“深部探测技术与实验研究”项目 (Sino-probe-08-04-01)、中国地质调查局地质大调查项目 (1212011220936) 资助。

第一作者: 沈滔 (1991—), 男, 硕士研究生, 地质学专业, 主要从事岩石地球化学方面的研究。E-mail: shentao32@163.com.

其矿物组合为石英 + 富铁的镁铁质暗色矿物 + 碱性矿物,斜长石含量极低甚至没有,岩石具有文象结构和晶洞构造,总体上属于一种深源浅成型花岗岩。随着研究的深入 A 型花岗岩已不再是“3A”这三个含义那么简单了,King et al.(1997)^[2] 通过澳大利亚 Lachlan 褶皱带中岩体研究,提出了铝质 A 型花岗岩的概念(即偏铝→弱过铝),并在随后的 10 多年在全球得到了广泛应用,我国学者在中国东部 A 型花岗岩研究中也发现郯庐断裂以东以铝质 A 型花岗岩为主,并多与 I 型花岗岩共生^[3-6]。对于华南来说,印支期花岗岩整体上呈面状分布(图 1),其中不乏大量岩体已被确定为 A 型花岗岩,但关

于铝质 A 型花岗岩的还鲜有报道,本文就根据近年来的研究成果对铝质 A 型花岗岩的岩相学、矿物学、地球化学特征及判别方式进行系统的阐述,并据此分析华南印支期 ALAG 的物质来源、成因及形成构造环境。

1 ALAG 概述

铝质 A 型花岗岩可简称为 ALAG,属于 A 型花岗岩的一个亚类。从岩相学和矿物学特征来看,ALAG 以二长花岗岩、碱长花岗岩为主,亦会出现在正长花岗岩、石英正长岩等中,造岩矿物为长石

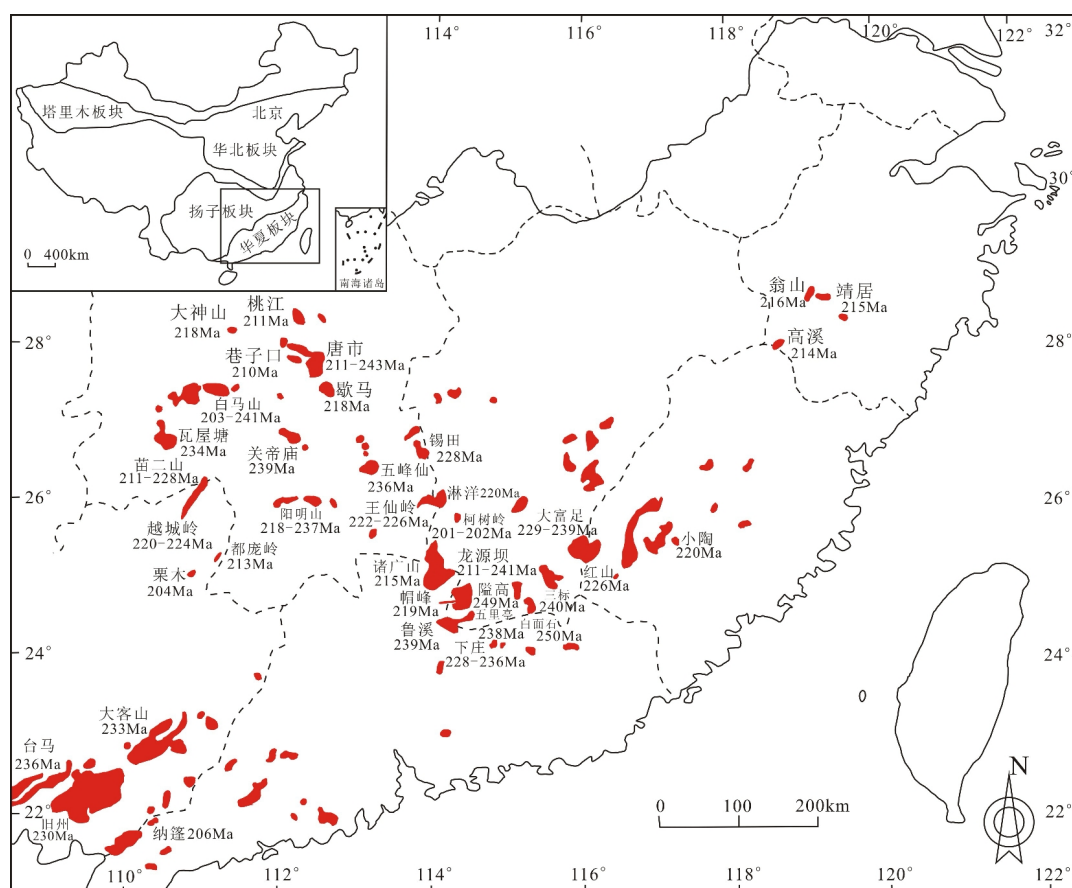


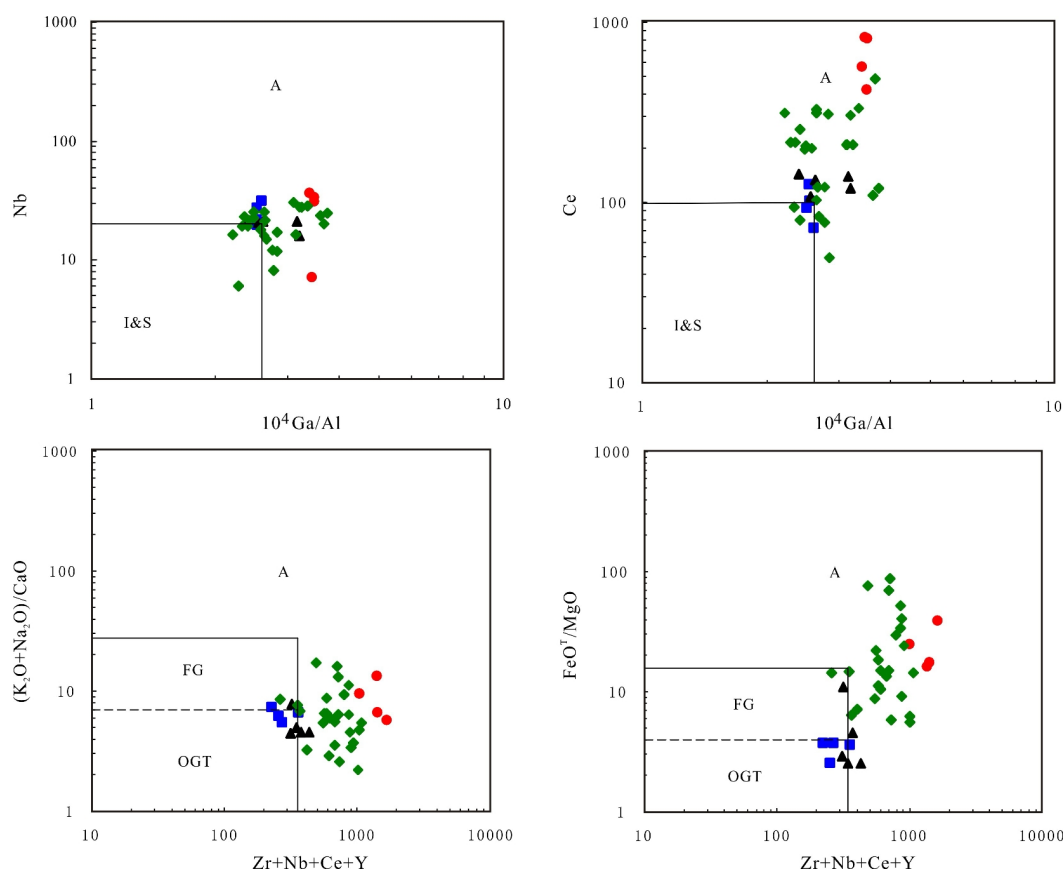
图1 华南印支期花岗岩分布简略图(据郭春丽等^[10])

Fig.1 Schematic map showing the distribution of the Indosinian granites in South China(modified after Guo C L,et al. ^[10])

(斜长石、条纹长石)(60%左右)、石英(35%左右),常出现普通角闪石、白云母、锰铝榴石等 Al 过饱和矿物及萤石等富 F 副矿物,暗色矿物以黑云母为主。从地球化学特征来看,ALAG 具有高的 SiO_2 (>70%)、 TiO_2 含量,高的 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$

比值,富铝,其 Al_2O_3 含量普遍大于 12%, A/CNK 值大于 1,富集高场强元素 HFSE(Ga、Zn、Y、Zr 等)、REE 等,F 的含量一般 $\leq 1000 \times 10^{-6}$,形成于相对还原的地质环境。

自上个世纪 90 年代铝质 A 型花岗岩提出以

图2 华南印支期铝质花岗岩体A型花岗岩判别图解(底图据Whalen et al.^[7])Fig.2 A-type granite discrimination diagram of Indosinian aluminum granitic pluton in South China(after Whalen et al. ^[7])

●-浙西南靖居花岗岩体; ■-粤北下庄岩体; ▲-湘东锡田岩体; ◆-海南中三叠世正长岩—花岗岩套

A: A型花岗岩; I&S: I型和S型花岗岩; FG: 分异的长英质花岗岩; OGT: 没分异的M、I和S型花岗岩

来, 它改变了我们原先所认识到的 A 型花岗岩的地球化学特征, 并随着其主元素、微量元素、稀土元素等方面的标识性特征见解的不断更新, 从根本上冲击了长久以来对于 A 型花岗岩的物质来源及生成方式的看法, 使得其很多成因研究的局面陷入了多解性。

2 ALAG 判别

研究者可以利用同位素定年手段来厘定花岗岩的形成时代; 利用 A 型花岗岩的矿物学、地球化学特征、形成构造环境等以及与其他类型花岗岩的明显差异来区分其是否为 ALAG, 而其中难点就是 A 型花岗岩与 I、S 型花岗岩的区分、A 型花岗岩亚类的区分。

从矿物学角度, 根据角闪石、堇青石和碱性暗色矿物的发育情况可以判别几大类型花岗岩, I 型

花岗岩中一般出现角闪石等镁铁质矿物, 典型的过铝质矿物几乎不出现, S 型花岗岩中普遍出现过铝质矿物, 如堇青石、石榴子石、电气石等, 基本不含包体, M 型花岗岩是浅色岩组, 很少出现暗色矿物, A 型花岗岩的镁铁质暗色矿物富 Fe。从化学成分角度, 判定 A 型花岗岩最有效的方法是 Ga/Al 的比值, $10^4 \text{Ga/Al} > 2.6$ 可以作为 A 型花岗岩的判别标志, 且高的 Ga/Al 比值只能出现在 AAG 和 ALAG 内, 但值得注意的是并不是所有 A 型花岗岩统统富 Ga, 此时判别就需与微量元素和稀土元素分布图解联用, 方为上策。

Whalen et al. (1987)^[7]和 Eby (1990, 1992)^[8-9]根据结晶分离作用及主元素、HFSE、LILE 的地球化学行为先后提出了 $10^4 \text{Ga/Al} - \text{Zr}$ (Nb, Ce, Y 等 HFSE)、 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 、 $10^4 \text{Ga/Al} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 、 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 等一系列判别图解, 在区分未分异的 A 型花岗岩与演化了的 I、S 型花岗岩时, 发挥了

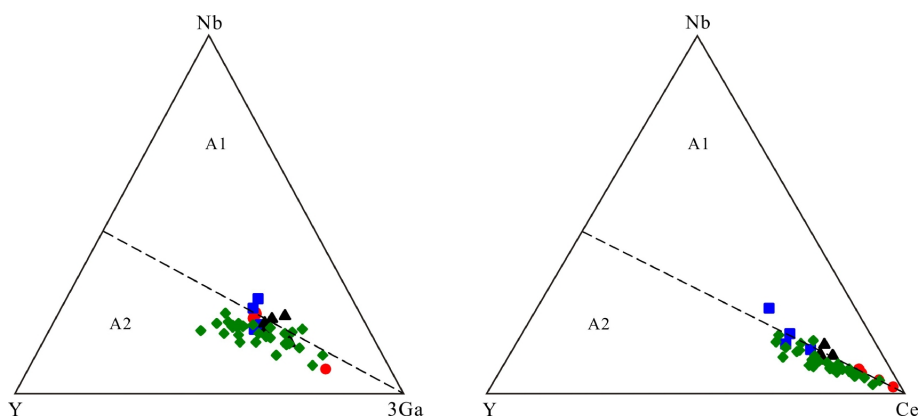


图3 华南印支期铝质花岗岩体A型花岗岩亚类判别图解(底图据Eby^[8];图例同图2)

Fig.3 A-type granite subclass discrimination diagram of Indosinian aluminum granitic pluton in South China (after Eby^[8]; Symbols are the same as those in Fig.2)

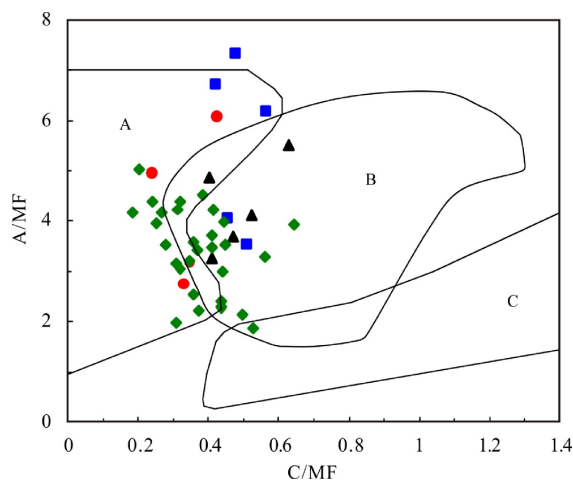


图4 华南印支期铝质A型花岗岩A/MF-C/MF图解

(底图据Alther et al.^[22];图例同图2)

Fig.4 A/MF-C/MF diagram for Indosinian Aluminum A-granites in South China

(After Alther et al. ^[22]; Symbols are the same as those in Fig. 2)

A-变质泥岩部分熔融;B-变质杂砂岩部分熔融;C-基性岩的部分熔融

重要的指示作用,但如果是高度分异的花岗岩类及分异的A型花岗岩时,这些判别图解则无效。King et al.(1997)^[2]和 Whalen et al.(1987)^[7]认为可以从岩石组合入手,判别更基性的端元组分及各自在同一组合中的比例来区分高分异I或S型花岗岩和未高度分异的A型花岗岩,但若三者都高度分异后,判别将出现困难。

当花岗岩类被完全确定为A型花岗岩后,此时ALAG的判别将越发简易。Eby(1990)^[8]将A型花岗岩分为A1(AAG)和A2(ALAG)两类,可用

$Y/Nb-Yb/Ta$ 、 $Y/Nb-Ce/Nb$ 、 $Nb-Y-3Ga$ 、 $Nb-Y-Ce$ 图解加以判别,再结合如上所述的ALAG岩相学、矿物学、地球化学特征及 $FeO^T/(FeO^T+MgO)$ 、 $AR-SiO_2$ 、 $A/CNK-A/NK$ 等图解来更加细致的区分AAG和ALAG,此外,温度也是判断ALAG的重要标志之一,在A型花岗岩的所有亚类中,ALAG形成温度最低。

3 物质来源及成因

纵观整个华南地区印支期花岗岩的分布及综合研究情况,不难发现印支期铝质花岗岩主要出露于江西、湖南、广西、广东和海南等省(区),而其中属于铝质A型花岗岩的很少,此处着重选取了几个具有ALAG特征的上述地域印支期代表性岩体进行总体的分析探讨,分别为海南陵水-龙滚深断裂两侧及白沙深断裂南东侧的中三叠世正长岩-花岗岩套^[14-15]、粤北贵东复式花岗岩体中的下庄花岗岩体^[16-17]、浙西南的靖居正长花岗岩^[18]及湘东锡田复式岩体中的印支期成矿花岗岩^[19]。在 $10^4Ga/Al-Nb(Ce)$ 、 $(K_2O+N_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 、 $FeO^T/MgO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 判别图解上(图2)大部分岩体的相关数据绝大多数落入了A型花岗岩的区域,除粤北下庄岩体的归属看似还需商榷,很可能存在未分异的M、I和S型花岗岩或分异的长英质花岗岩外,其余岩体总体上应该均属于A型花岗岩,这也与前人研究大致相符。此外,利用 $Nb-Y-3Ga$ 、 $Nb-Y-Ce$ 图解(图3)来再次区分A型花岗岩亚类的研究发现,这些岩体所属的A型花

岗岩基本为 A2 类,可以判定为铝质 A 型花岗岩。

华南地区的印支期铝质花岗岩主要为印支造山运动后陆壳加厚背景下地壳物质部分熔融产物^[10]。关于铝质 A 型花岗岩的成因众多学者提出了多种模式,主要有:①下部地壳物质的部分熔融,源区的成分主要是镁铁质的^[11-12];②具有正常水含量的长英质下地壳的部分熔融,源区是经过地幔流体交代而成为饱满型(fertile)源区,即富集碱质和 HFSE,最理想的源区岩石应是饱满型长英质麻粒岩^[2];③幔壳物质混熔的产物,源区位于幔-壳边界相互作用带内,由饱满型长英质麻粒岩低度部分熔融作用所形成^[3,13];等。

前人关于这些岩体的判别、物质来源及成因的相关研究表明:海南陵水-龙滚深断裂两侧存在三叠纪 ALAG,其是古老陆壳的熔融物与少量幔源基性岩浆混合并分异的产物,并且此岩浆可能与富集地幔(EMI)或 EMI 的派生物质有关^[14];印支期下庄岩体很可能存在 ALAG, A/MF-C/MF 元素比值对比分析表明原岩可能为变质泥岩与变质砂岩部分熔融共同作用的产物^[16];浙西南靖居正长花岗岩属印支期 ALAG,其岩浆物质来源于华夏地块古老的变质基底岩石的部分熔融^[18];湘东锡田复式岩体中的 A 型花岗岩岩体至少经历过两期侵位,其中印支期(第一期)花岗岩为 ALAG,其很可能为华夏地

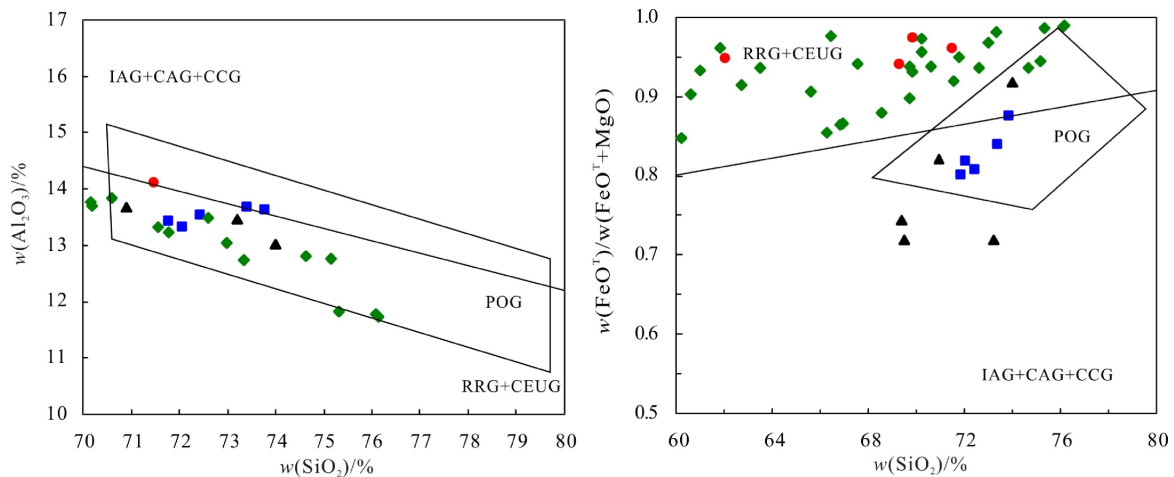


图5 华南印支期铝质A型花岗岩构造环境判别图解(底图据Maniar et al.^[36];图例同图2)

Fig.5 Diagrams for discrimination the structural environment of Indosinian Aluminum A-granites in South China

(After Maniaret al.^[36]; Symbols are the same as those in Fig.2)

IAG-岛弧花岗岩类;CAG-大陆弧花岗岩类;CCG-大陆碰撞花岗岩类;POG-后造山花岗岩类;RRG-与裂谷有关的花岗岩类;CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

块古元古代晚期地壳物质部分熔融形成^[19]。

近年来,虽然已经发现华南地区出露着大量的印支期铝质花岗岩^[20-21],但大多数属于 S 型和 I 型花岗岩,明确为 A 型的还不是很多,如赣南大吉山五里亭岩体,广东江门地区的共和、杨梅、鹤城岩体,湘东南大义山岩体,贵东花岗岩体(帽峰岩体、鲁溪岩体、下庄岩体)等都很有可能存在印支期铝质花岗岩,但属不属于 A 型花岗岩目前仍存在争议。

相关研究发现华南不同时代不同地区的铝质 A 型花岗岩从未见到具有亲缘演化关系的其他侵入岩与其直接共生,可以认为他们是同一岩浆分异

演化的产物。Alther et al.(2000)^[22]的 A/MF-C/MF 判别图解上(图 4)暗示了目前所发现的华南印支期铝质 A 型花岗岩投点几乎全部分布于变质泥岩和变质杂砂岩两者混合区域,只有海南中三叠世正长岩-花岗岩套中存在个别点于基性岩区,暗示了其成因有更深部的物质加入。

4 形成的构造环境

大多学者研究认为华南印支期花岗岩早期形成于挤压环境同碰撞,晚期形成于伸展环境后碰撞,但对于由挤压向伸展环境转换的时间问题,依

然存在着显著地争议^[23-26]。研究者多将华南印支期岩浆活动归因于与印支地块和华南陆块碰撞相关的印支运动的影响。Wang Q et al.(2005)^[27]研究认为古太平洋板块在印支期已影响到东南沿海地区;Li X H et al.(2006)^[28]在海南岛发现了代表古太平洋板块俯冲的二叠纪弧岩浆活动,并认为华南印支期岩浆活动受控于古太平洋板块俯冲的影响。

值得注意的是,华南印支期花岗岩 90%以上为过铝质 I 型或 S 型花岗岩,其中强过铝花岗岩占印支期花岗岩的 72.7%^[29]。一些年代学的研究资料也表明,华南的一些复式岩体,岩浆活动延续时间长,可能一个岩体内会有印支早期、印支晚期甚至燕山期的花岗岩产出,所以对于印支期华南地区花岗岩形成构造环境,需要结合多方面的资料来进行判定。此外,除早期认为的非造山之外,现今大多数已认为还有另一类后造山(或造山后)A 型花岗岩^[29,30-35],A 型花岗岩和碱性岩的形成与出现是整个造山期的结束和板内期的来临的标志之一,是后造山阶段的特征产物。

以上述海南中三叠世正长岩-花岗岩套、粤北下庄岩体、浙西南靖居花岗岩体以及湘东锡田岩体为研究对象,笔者在 Maniar 和 Piccoli(1989)^[36]提出的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ 两组构造环境判别图解(图 5)中发现,前者大部分数据点均落位于 POG 即后造山花岗岩类区域,后者显示存在差异:粤北、湘东及海南个别数据点落入了 POG 区域,且湘东还出现了落入 IAG+CAG+CCG 区域的现象,但大部分海南及浙西南所有数据点分布于 RRG+CEUG 区域,这可能与古太平洋板块向中国东南大陆的俯冲抬升或俯冲诱导的板内伸展-裂解有关;而 Eby(1992)^[9]如图 3 认为 A1 代表非造山阶段的产物,A2 代表后造山的产物,再次证明了这些岩体中 ALAG 的形成构造环境。

5 总结与展望

(1)华南印支期 ALAG 成岩物质应来源于华夏地块古老变质沉积岩不同程度的部分熔融,在其形成过程中有可能混染当时的基性地幔组分,这与华南早中生代多期次的岩石圈伸展-减薄有关,而构造环境主要受控于古太平洋板块的俯冲作用,形成于后造山阶段,但应也受到了印支地块与华南陆块的后碰撞过程所影响。

(2)华南印支期 A 型花岗岩的成因、构造环境、岩浆演化以及动力学机制一直存在很大争论。面对 ALAG 众多的成因模式、复杂多变的构造环境以及华南印支期 ALAG 岩石学、地球化学的特殊性,其研究还需不断探索发现,不断的寻找更多的证据与方法,特别是关于构造环境中伸展和挤压及其时间的转变问题,值得深思。

(3)随着研究的进展,理论的深入,可能华南一些已经被确定为其他类型的花岗岩的岩体也会随之被改观,而 ALAG 将可能会更侧重于其与 AAG 之间分异、对岩浆活动的指示意义、与金属成矿的关系以及其是否具有成矿专属性等方面研究,并且其可能在东南沿海产出的发现率将会明显提高。

参考文献:

- [1] Loiselle M C and Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites [J].Geology Society of America Bulletin (Abstracts with Programs),1979,11:468.
- [2] King P L,White A J R and Chappell B W. Characterization and origin of aluminous A-type granites of the Lachlan Fold Belt,southeastern Australia [J].Journal of Petrology,1997,36: 371 - 391.
- [3] 邱检生,王德滋,蟹泽聪史,Brentl A McInnes.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.
- [4] 王德滋,周金城,邱检生,范洪海.中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩特征与成因[J].高校地质学报,2000,6 (4):487 - 496.
- [5] 苏玉平,唐红峰.A 型花岗岩的微量元素地球化学[J].矿物岩石地球化学通报,2005,24(3):245 - 251.
- [6] 周宇章,邢光福,杨祝良,沈加林,陈荣,包超民,魏乃颐.浙江诸暨新元古代后造山铝质 A 型花岗岩的厘定[J].地球学报,2006,27(2):107 - 113.
- [7] Whalen J B,Currie K L and Chappell B W.A-Type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis [J].Contributions to Mineralogy and Petrology,1987,95(4):407 - 419.
- [8] 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.
- [9] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids:Petrogenetic and tectonic implications [J]. Geology,1992,20:641 - 644.
- [10] 郭春丽,郑佳浩,楼法生,曾载淋.华南印支期花岗岩类

- 的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J].大地构造与成矿学,2012,36(3):457–472.
- [11] Poitrasson F, Duthou J L and Pin C. The relationship between petrology and Nd isotopes as evidences for contrasting anorogenic granite genesis: example of the Corsican Province (SE France) [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 1251–1274.
- [12] Poitrasson F, Pin C, Duthou J L and Platevoet Bernard. Aluminous subsolvus anorogenic granite genesis in the light of Nd isotopic heterogeneity [J]. *Chemical Geology*, 1994, 112: 199–219.
- [13] 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢. 广东龙口南昆山铝质A型花岗岩的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 1–10.
- [14] 周佐民, 谢才富, 徐倩, 高大飞. 海南岛中三叠世正长岩-花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 515–531.
- [15] 马大铨, 康先济, 赵子杰. 海南岛地质(二)岩浆岩[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 274.
- [16] 吴继光. 粤北下庄岩体岩石化学特征与铀成矿关系探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(3): 164–177.
- [17] 吴烈勤, 黄国龙, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 刘汝洲, 邹志文. 粤北下庄花岗岩地球化学特征与成因研究[J]. 铀矿地质, 2005, 21(2): 65–71.
- [18] 李万友, 马昌前, 刘园园, Paul T. Robinsin. 浙江印支期铝质A型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 164–177.
- [19] 姚远, 陈骏, 陆建军, 章荣清. 湘东锡田A型花岗岩的年代学、Hf同位素、地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(3): 467–488.
- [20] 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2321–2325.
- [21] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 妖军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291–304.
- [22] Alther R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50: 51–73.
- [23] 孙涛, 周新民, 陈培荣, 李惠民, 周红英, 王志成, 沈渭洲. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(12): 1209–1218.
- [24] Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, Zhang Y H and Peng T P. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province [J]. *Lithos*, 2007, 96: 475–502.
- [25] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26–33.
- [26] 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 邱检生, 赵蕾. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1441–1456.
- [27] Wang Q, Li J W, Jian P, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W, Xu J F, Li C F and Ma J L. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2005, 230: 339–354.
- [28] Li X H, Li Z X, Li W X and Wang Y J. Initiation of the indosinian orogeny in South China: Evidence for a permian magmatic arc on Hainan island [J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114: 341–353.
- [29] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006, 25: 332–337.
- [30] Rogers J J W and Greenberg J K. Late-orogenic, post-orogenic and anorogenic granites: distinction by major-element and trace-element chemistry and possible origins [J]. *The Journal of Geology*, 1990, 98(3): 291–309.
- [31] Sylvester P J. Post-collisional alkaline granites [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97: 261–280.
- [32] 许保良, 黄福生. A型花岗岩的类型、特征及其地质意义[J]. 地质探索, 1990, 3: 113–120.
- [33] Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Fenag S. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings [J]. *Lithos*, 1998, 45: 45–70.
- [34] 洪大卫, 王式浣, 黄怀曾. 中国北疆及其邻区晚古生代-三叠纪碱性花岗岩带及其地球动力学意义初探 [M]. 北京: 地质出版社, 1991, 40–48.
- [35] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [36] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1989, 101: 635–643.