

文章编号: 1000-6524(2004)03-0203-11

南岭中西段若干复式花岗岩体的成因模式研究

汪传胜, 汪相, 姚晓娟

(南京大学地球科学系, 江苏南京 210093)

摘要: 岩石学、岩石地球化学、黑云母矿物化学和副矿物特征等研究表明, 南岭中西段3个复式花岗岩体的演化规律表现为两种方式: 一种是以花山复式花岗岩体为代表的不同母岩浆演化方式, 其补体美华花岗岩可能经历了与花山主体岩浆相似的分离结晶作用; 另一种是以金鸡岭复式花岗岩体和大东山复式花岗岩体为代表的相同母岩浆演化方式, 它们的补体螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩分别为金鸡岭主体和大东山主体花岗质母岩浆经过分离结晶作用形成。两种不同产出方式的补体花岗岩可能表明它们与主体岩浆的形成机制不同。

关键词: 复式花岗岩体; 主体; 补体; 母岩浆; 分离结晶作用; 南岭

中图分类号: P588.12⁺1; P581

文献标识码: A

Petrogenetic models of the composite granitic plutons in the mid-western Nanling Region

WANG Chuan_sheng, WANG Xiang and YAO Xiao_juan

(Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on studies of petrology, geochemistry, mineralogical chemistry of biotites, the authors hold that the three composite granitic plutons in the mid-western Nanling Region display two petrogenetic models. One is the evolutionary model of magmas with different parents, which occurred in the Huashan composite granitic plutons, and the Meihua supplementary granite might have resulted from derivative liquids segregated from fractional crystallization of magmas equivalent to Huashan magmas. The other is the evolutionary model of magmas with the same parent, which occurred in the Jinjiling and Dadongshan composite granitic plutons. Their supplementary bodies, namely Pangxiemu granite and Zhutishi granite, resulted from the condensation of the residual magmas, and the two residual magma bodies were generated by fractional crystallization of the parental magmas of the Jinjiling and Dadongshan main bodies respectively. Two kinds of evolutionary models of the supplementary granites may suggest the different genetic mechanisms of magmas of their main bodies.

Key words: composite granitic plutons; main bodies; supplementary bodies; parental magmas; fractional crystallization; Nanling Region

复式花岗岩体通常是指近同一时代不同阶段的花岗质岩浆侵入定位在相近空间位置而形成的若干个花岗岩的复合体。在南岭地区, 许多花岗岩都以

复式岩体的形式产出, 其中有一类表现为: 早期的花岗岩呈中粗粒-粗粒结构, 其出露面积占复式岩体的主导地位, 被称为主要花岗岩体(简称主体); 晚期的

收稿日期: 2003-12-25; 修订日期: 2004-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172023); 国家自然科学基金重点资助项目(40132010)。

作者简介: 汪传胜(1971-), 男, 硕士, 主要从事花岗岩地质和地球化学研究, E-mail: wangcsah@sohu.com。

花岗岩呈细粒-中细粒结构,颜色较浅,往往呈岩株、岩脉或岩枝等出露,面积较小,侵入在主体花岗岩的内部,被称为补充花岗岩体(简称补体)。在诸广山复式岩体(莫柱荪等,1980)、贵东复式岩体(张成江,1991)、佛冈复式岩体(陈小明等,2002;刘昌实等,2003)中都可以找到这类复式花岗岩体的实例,在世界其他地区也有大量该类复式花岗岩体广泛分布,如英格兰西南部的 Carnmenellis 复式岩体(Charoy,1986)、南非好望角省西部 Saldania 复式岩体(Scheepers,1995)、西欧伊比利亚半岛上的 Jalama 复式岩体(Ramirez and Grundvig.,2000),等等。

对于这类复式岩体,由于补体的时空局限性,地质学家往往只关注主体花岗岩的岩石学属性及其与构造作用的关系,而忽视补体花岗岩可以提供的成因信息。近年来,一些地质工作者在主体花岗岩的研究基础上开展了对补体花岗岩的探索工作,但结果几乎都是把补体当作主体的岩浆演化产物(金跃群等,1985;章邦桐等,2001;陈小明等,2002;张敏等,2003)。然而,补体的成因模式并不是单一的,它们形成过程的差异性可以揭示主体花岗岩的成因特征。

在前人研究工作基础上(金跃群等,1985;朱金

初等,1988;章邦桐等,2001;张敏等,2003),笔者试图以南岭西、中段燕山期花山复式花岗岩体(桂东北)、金鸡岭复式花岗岩体(湘西南)、大东山复式花岗岩体(粤湘交界处)为例,通过岩石学、岩石地球化学和黑云母矿物化学等方法,探讨复式花岗岩体中主体和补体的相互关系,从而提出南岭地区复式花岗岩体的两种不同成因模式。

1 地质概况

南岭在地理上指长江和珠江流域分水岭一带的山地,花岗岩体的出露面积约为 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中多呈复式岩体产出(莫柱荪等,1980)。笔者选择了下面3个具有一定研究程度的复式花岗岩体作为研究对象(图1a)。这3个复式花岗岩体的主体和补体均为燕山期花岗岩,位于南岭东西向构造带的西、中段,是南岭构造-岩浆带的重要组成部分。各复式岩体主体和补体之间在岩石学特征上表现为一种突变关系,补体呈岩枝、岩株和岩脉等产状侵位于主体内部,但主体本身由外到内呈现一种渐变过渡关系,如由边缘相到过渡相再到中心相。主体的中心相具粗粒结构,而位于其内部的补体则具细粒结构。

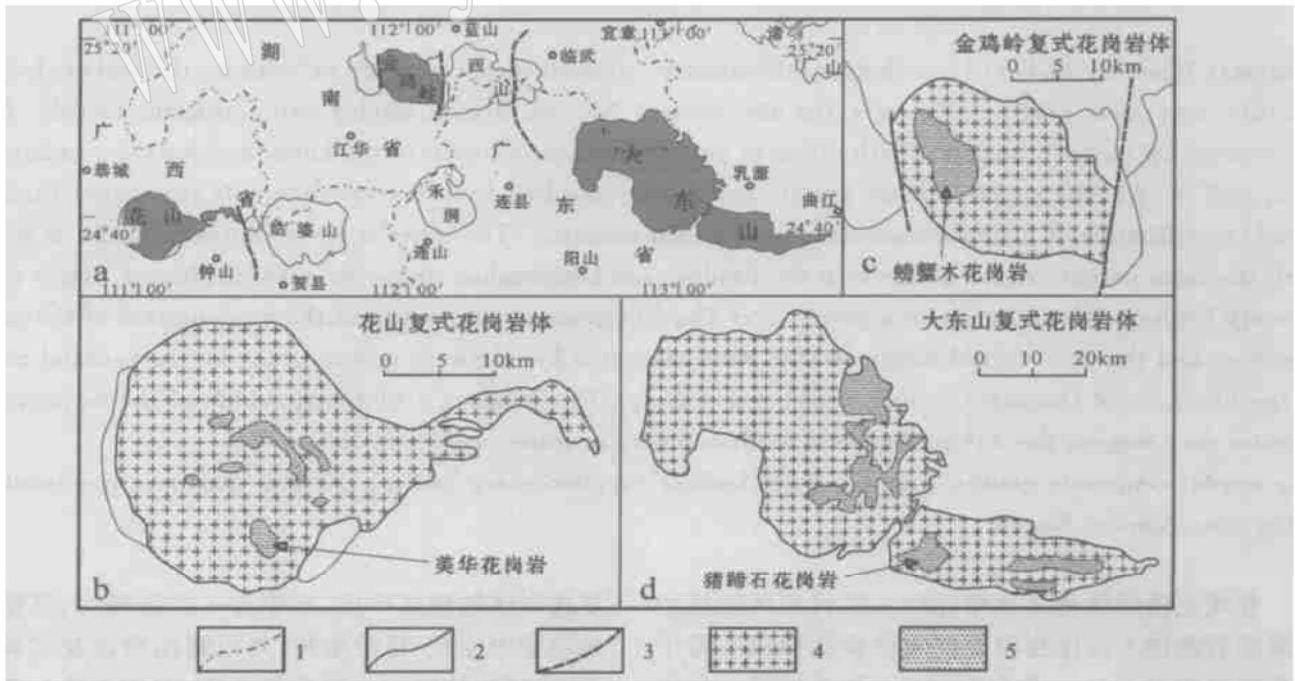


图1 南岭地区花山、金鸡岭和大东山等复式花岗岩体分布简图

Fig. 1 Schematic geological map showing distribution of Huashan, Jinjiling and Dadongshan composite granitic plutons in Nanling Region

1—省界线; 2—岩体边界线; 3—断层; 4—粗粒黑云母花岗岩; 5—浅色细粒花岗岩

1—province boundary; 2—pluton boundary; 3—fault; 4—coarse-grained biotite granite; 5—fine-grained leucogranite

(1) 花山复式花岗岩体: 位于广西省钟山、平乐和恭城三县交界处, 呈近圆形, 出露面积约 571 km² (图 1b)。主体为花山黑云母花岗岩, 呈斑状或似斑状结构, 粒度变化明显, 为粗粒(中心相) → 中粗粒(过渡相) → 中粒(边缘相), 其矿物成分为条纹长石(43%)、斜长石(*An*14~33, 18%)、石英(35%)、黑云母(约 4%), 边缘相中含有少量角闪石。补体为呈岩株、岩枝和岩脉产出的美华、银屏和蒙冲等花岗岩体, 出露面积较小, 形态不规则, 相对集中在主体的中部, 与主体呈侵入接触关系。本文选取美华花岗岩作为补体研究对象, 其岩性为浅色细粒二长花岗岩, 矿物成分为微斜长石(35%)、钠更长石(*An*1~18, 28%)、石英(35%)、黑云母(约 1%)、白云母(小于 1%)。

(2) 金鸡岭复式花岗岩体: 位于湖南省蓝山县境内, 呈不规则椭圆形, 出露面积约 379 km² (图 1c)。早期的金鸡岭岩体构成复式岩体的主体, 岩性为粗粒斑状黑云母花岗岩, 其矿物成分为条纹长石(42%~48%)、斜长石(*An*14~38, 18%~22%)、石英(30%~31%)、黑云母(约 4%)。晚期的螃蟹木花岗岩呈岩株产出于金鸡岭岩体的内部, 岩性为细粒二

云母花岗岩, 矿物成分为微斜长石(33%~37%)、钠长石(*An*1~3, 24%~28%)、石英(31%~35%)、黑云母(1%~2%)、白云母(约 2%)。

(3) 大东山复式花岗岩体: 位于广东省和湖南省的交界处, 呈不规则状, 北西-南东东向展布, 出露面积约 2 250 km² (图 1d)。主体为早期的大东山岩体, 岩性为中粗粒-粗粒斑状黑云母花岗岩, 其矿物成分为条纹长石和少量微斜长石(40%~43%)、斜长石(*An*8~35, 24%~26%)、石英(28%~30%)、黑云母(3%~4%)、白云母(约 2%)。晚期的补体呈岩株和岩枝产出, 形态不规则, 出露面积相对较大, 约占整个复式岩体的五分之一。本文选取较大面积的猪蹄石花岗岩作为补体研究对象, 其岩性为细粒白云母花岗岩, 矿物成分为微斜长石(37%)、钠长石(*An*1, 24%)、石英(34%)、白云母(约 4%)。

2 岩石地球化学特征

2.1 主量元素

3 个复式花岗岩体中的主量元素成分是在南京大学现代分析中心采用 XRF 方法测定的, 化学分析结果列于表 1。为了加强研究结论, 在以下的图表中

表 1 3 个复式花岗岩体岩石化学成分 (*w_B* / %) 及其参数

Table 1 Chemical compositions of three composite granitic plutons and related parameters

| 岩体 样品 | 花山复式花岗岩体 | | | | 金鸡岭复式花岗岩体 | | | | 大东山复式花岗岩体 | | | | 澳 S (n=205) | 华南 S (n=300) |
|------------------------------------|----------|-------------|--------|-------------|-----------|--------------|---------|-------------|-----------|--------------|---------|-------------|----------------|-----------------|
| | 花山(主体) | | 美华(补体) | | 金鸡岭(主体) | | 螃蟹木(补体) | | 大东山(主体) | | 猪蹄石(补体) | | | |
| | HS_1 | A(n=10) | MH_1 | B(n=2) | JJL_3 | C(n=3) | PXM_2 | D(n=2) | DDS_5 | E(n=8) | DDS_4_2 | F(n=3) | | |
| SiO ₂ | 72.43 | 72.24(1.48) | 77.23 | 76.88(0.21) | 72.97 | 76.01(0.93) | 76.21 | 76.33(0.53) | 74.40 | 76.14(1.10) | 75.51 | 76.93(1.13) | 73.39 | 72.82 |
| TiO ₂ | 0.24 | 0.23(0.08) | 0.06 | 0.03(0.00) | 0.30 | 0.12(0.07) | 0.05 | 0.04(0.01) | 0.30 | 0.18(0.04) | 0.05 | 0.11(0.02) | 0.28 | 0.26 |
| Al ₂ O ₃ | 13.81 | 13.83(0.54) | 12.42 | 12.85(0.01) | 13.31 | 12.35(0.12) | 12.57 | 12.55(0.24) | 12.61 | 12.37(0.59) | 14.01 | 12.73(0.87) | 13.45 | 13.51 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.97 | 0.92(0.07) | 0.33 | 0.43(0.51) | 0.84 | 0.44(0.32) | 0.93 | 0.27(0.27) | 0.72 | 0.53(0.19) | 0.53 | 0.41(0.34) | 0.36 | 0.83 |
| FeO | 1.53 | 1.64(0.55) | 0.97 | 0.48(0.12) | 2.22 | 1.33(0.32) | 0.50 | 0.77(0.78) | 1.61 | 0.87(0.25) | 0.43 | 0.35(0.17) | 1.73 | 2.12 |
| MnO | 0.03 | 0.05(0.01) | 0.03 | 0.02(0.01) | 0.04 | 0.04(0.01) | 0.03 | 0.07(0.04) | 0.04 | 0.04(0.01) | 0.08 | 0.03(0.01) | 0.04 | 0.06 |
| MgO | 0.17 | 0.83(1.68) | 0.01 | 0.02(0.13) | 0.17 | 0.07(0.04) | 0.06 | 0.10(0.13) | 0.36 | 0.16(0.09) | 0.03 | 0.05(0.05) | 0.58 | 0.72 |
| CaO | 1.12 | 1.17(0.30) | 0.52 | 0.53(0.25) | 1.35 | 0.36(0.05) | 0.65 | 0.63(0.35) | 1.35 | 0.77(0.14) | 0.14 | 0.25(0.22) | 1.28 | 1.20 |
| Na ₂ O | 3.29 | 3.23(0.15) | 3.91 | 3.83(0.42) | 3.07 | 3.05(0.59) | 3.46 | 3.03(0.40) | 2.63 | 2.97(0.32) | 3.60 | 2.98(0.85) | 2.81 | 2.73 |
| K ₂ O | 5.91 | 5.52(0.37) | 4.27 | 4.25(0.30) | 5.19 | 5.46(0.29) | 4.71 | 4.33(0.74) | 4.95 | 5.04(0.35) | 4.74 | 4.81(0.42) | 4.56 | 4.40 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.11(0.03) | 0.01 | 0.04(0.02) | 0.05 | 0.04(0.00) | 0.02 | 0.03(0.03) | 0.07 | 0.04(0.02) | 0.05 | 0.02(0.01) | 0.14 | 0.11 |
| LOI | 0.50 | 0.01(0.00) | 0.02 | 0.01(0.00) | 0.29 | 0.66(0.02) | 0.81 | 1.07(0.16) | 0.63 | 0.87(0.27) | 0.77 | 1.10(0.65) | | |
| Total | 100.1 | 99.44(0.59) | 99.78 | 99.78(0.49) | 99.81 | 100.01(0.62) | 100.0 | 99.25(0.93) | 99.67 | 100.07(0.12) | 99.94 | 99.82(0.05) | 98.62 | 98.76 |
| A/CNK | 0.997 | 1.032 | 1.035 | 1.037 | 1.014 | 1.056 | 1.050 | 1.151 | 1.039 | 1.054 | 1.239 | 1.208 | 1.132 | 1.181 |
| Al ⁺ | -1 | 8 | 8 | 20 | 4 | 15 | 12 | 32 | 9 | 12 | 53 | 43 | 31 | 41 |
| NK/A | 0.855 | 0.817 | 0.830 | 0.847 | 0.801 | 0.884 | 0.858 | 0.777 | 0.768 | 0.835 | 0.789 | 0.791 | 0.711 | 0.685 |
| ALK | 9.20 | 8.75 | 8.18 | 8.07 | 8.26 | 8.51 | 8.17 | 7.41 | 7.58 | 8.00 | 8.34 | 7.79 | 7.37 | 7.13 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 1.80 | 1.71 | 1.09 | 1.13 | 1.69 | 1.79 | 1.36 | 1.40 | 1.88 | 1.70 | 1.32 | 1.61 | 1.62 | 1.61 |
| A.R | 2.6 | 2.5 | 4.1 | 3.7 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 2.8 | 2.2 | 2.6 | 3.1 | 2.7 | 2.2 | 2.2 |
| MF | 0.11 | 0.23 | 0.01 | 0.04 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.15 | 0.22 | 0.18 | 0.06 | 0.12 | 0.33 | 0.31 |

A 和 B—平均值(朱金初等, 1988), C 和 D—平均值(章邦桐等, 2001), E 和 F—平均值(张敏等, 2003); 小括号内数据表示标准偏差; 澳 S—澳大利亚 Lachlan 褶皱带 S 型花岗岩平均值(Whalen *et al.*, 1987), 华南 S—华南 S 型花岗岩平均值(徐克勤等, 1989); A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O), 摩尔数比; Al⁺ = [Al - (Na + K + 2Ca)]_{atom} × 1 000; NK/A = (Na₂O + K₂O) / Al₂O₃, 摩尔数比; 碱度率 A.R = (Al₂O₃ + CaO + 2Na₂O) / (Al₂O₃ + CaO - 2Na₂O); ALK = Na₂O + K₂O (*w_B* / %); MF = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe³⁺ + Fe²⁺)。

同时采用前人的分析数据一并加以分析。

3个复式花岗岩体中的主体均为弱过铝质, A/CNK值的变化范围为 0.997~ 1.066。而在其补体中, 美华花岗岩的 A/CNK 值一般小于 1.10, 为弱-中等过铝质, 螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩的 A/CNK 值一般大于 1.10, 为强过铝质。在 ACF 图(图 2)中, 3个复式花岗岩体的主体与补体的分析点均落在斜长石-黑云母线之上。进一步分析可以看到, 3个复式花岗岩体的主体非常相似, 均投影在斜长石-黑云母-堇青石组合区内, 而 3个补体的投影点在斜长石-黑云母-白云母组合区内, 且显示一定的差异性。美华花岗岩的投影点与对应的主体部分重合, 远离白云母标点, 而螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩的投影点则与对应主体较少重合, 且靠近白云母标点。在 A/CNK 值和在 ACF 图中的投影方面, 3个复式花岗岩体与我国华南 S 型花岗岩和澳大利亚 Lachlan 褶皱带 S 型花岗岩很类似(徐克勤等, 1989; Chappell and White., 1992)。

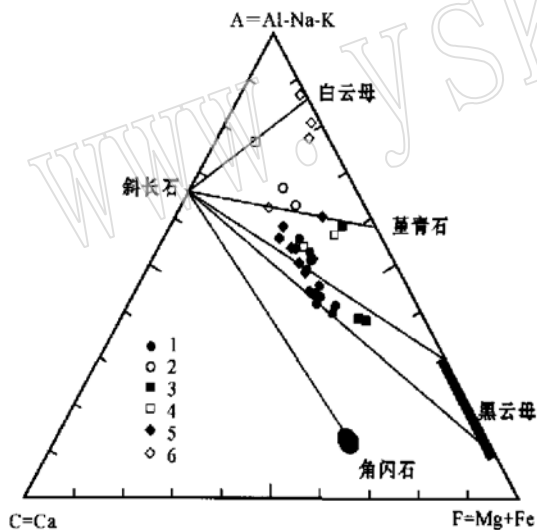


图 2 复式花岗岩体 ACF 图解(据 Chappell *et al.*, 1984)

Fig. 2 ACF diagram of composite granitic plutons
(after Chappell *et al.*, 1984)

1—花山花岗岩; 2—美华花岗岩; 3—金鸡岭花岗岩; 4—螃蟹木花岗岩; 5—大东山花岗岩; 6—猪蹄石花岗岩; 实心表示主体, 空心表示补体

1—Huashan granite; 2—Meihua granite; 3—Jinjingling granite; 4—Pangxiemu granite; 5—Dadongshan granite; 6—Zhutishi granite; Solid symbol signifies the main body, whereas hollow symbol indicates the supplementary body

在主要氧化物的哈克图解(图 3)上, 3个主体的线性关系明显, 表现为随着 SiO_2 升高, CaO 、 MgO 、 FeO^T 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 和 K_2O 的含量降低, Na_2O 的含量变化不大; 3个补体的线性关系较主体的差, 但美华补体的线性相关性明显好于另两个补体。另外, 3个补体的变化趋势也有所差异, 美华花岗岩中 CaO 、 MgO 、 FeO^T 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 和 K_2O 的含量随着 SiO_2 的升高而降低, Na_2O 含量升高, 而螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩中 MgO 、 FeO^T 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O 的含量随 SiO_2 的升高而降低, CaO 的含量升高。在补体和对应主体的关系上, 花山复式花岗岩体与另外两个复式花岗岩体明显不同: 在花山复式花岗岩体中, 美华花岗岩和花山主体的组分不同, 在哈克图解上明显分开; 而在金鸡岭复式花岗岩和大东山复式花岗岩中, 补体和主体的组分相似, 在哈克图解上有所重叠。

2.2 微量元素

选择了 3 个复式花岗岩体中的 6 个代表性样品, 在南京大学成矿作用国家重点实验室用 ICP-MS 法(Finnigan Element 2)进行了微量元素的测定, 分析结果列于表 2。

2.2.1 稀土元素

在稀土元素总量上, 3个主体明显较高, 皆大于 100×10^{-6} , 与华南陆壳重熔型系列花岗岩相似 ($\Sigma\text{REE} = 100 \times 10^{-6} \sim 550 \times 10^{-6}$); 3个补体相对各自的主体, 稀土元素总量和轻稀土元素明显偏低, 重稀土元素却相对富集, 轻重稀土元素总量之比降低, 其中美华花岗岩降低明显, 由 11.0~ 12.4 降到 2.1~ 4.3, 螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩分别由 5.9~ 7.2 和 4.8~ 11.5 降到 1.6~ 2.1 和 1.4~ 2.1。

在稀土元素的配分模式上, 3个复式花岗岩体的主体均表现为微弱右倾的形式, 但补体之间表现出明显的差别(图 4): 美华花岗岩的配分模式为右倾, 但斜率比花山主体的小; 螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩的配分模式为“燕”形, 在重稀土元素部分的配分模式上, 前者明显高于金鸡岭主体, 而后者近似或弱高于大东山主体。

在 Eu 含量上, 3个主体表现为中等负异常, $\delta\text{Eu} = 0.152 \sim 0.295$, 而相应的补体表现为强烈的负异常, $\delta\text{Eu} = 0.004 \sim 0.096$ 。在 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解(图 5)中, 3个复式花岗岩体的样品点均集中分布在分离

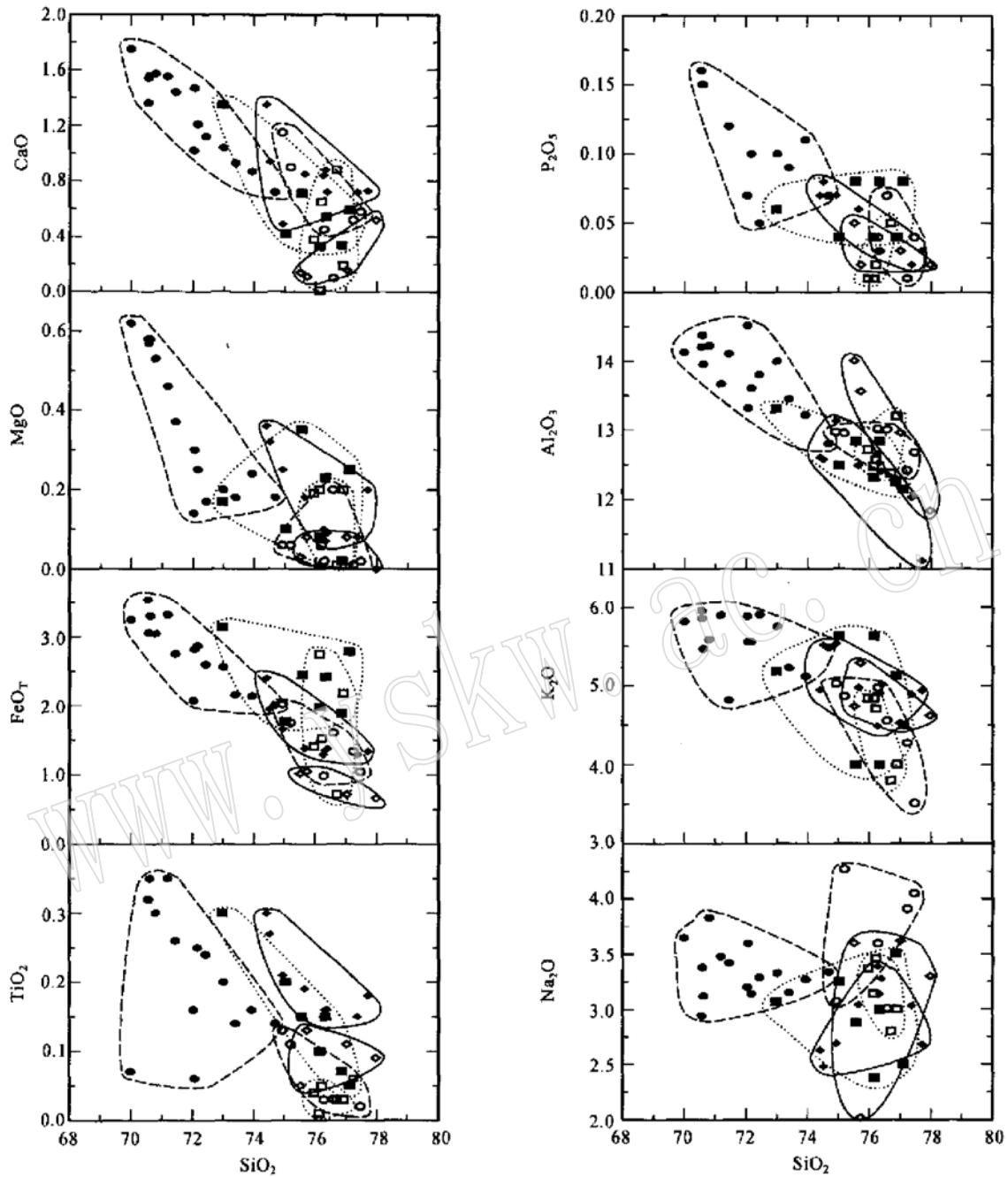


图 3 花山、金鸡岭和大东山等复式花岗岩体主要氧化物哈克图解

Fig. 3 Harker diagrams of selected major oxides in Huashan, Jinjiling and Dadongshan composite granitic plutons

图例同图 2

Symbols as for Fig. 2

结晶线上, 3 个补体 La 和 La/Sm 值比相应主体的要低。

2. 2. 2 其他微量元素

在原始地幔标准化图解上(图 6), 3 个复式花岗岩体的主体和补体的变化趋势相似, 表现为由 Ba、

Nb、Sr、P、Zr 和 Ti 构成谷, Rb、U、Ta、Nd、Sm 和 Tb 构成峰的配分形式。补体与主体相比, 补体中构成谷的元素 Ba、Sr、P 和 Ti 更为亏损, 而构成峰的元素 Rb、U 和 Ta 较为富集。

Zr/Hf、Nb/Ta、Rb/Sr 和 Rb/Ba 值 3 个主体很

表2 三个复式花岗岩体微量元素含量($w_B/10^{-6}$)及相关比值

Table 2 Trace element contents of three composite granitic plutons and related ratios

| 岩体 | 花山复式花岗岩体 | | | | 金鸡岭复式花岗岩体 | | | | 大东山复式花岗岩体 | | | |
|-------|----------|---------------|--------|--------|-----------|---------------|---------|--------|-----------|---------------|---------|---------------|
| | 花山(主体) | | 美华(补体) | | 金鸡岭(主体) | | 螃蟹木(补体) | | 大东山(主体) | | 猪蹄石(补体) | |
| 样品 | HS_1 | G(n= 2) | MH_1 | II_6_2 | JJL_3 | H(n= 2) | PXM_2 | J43 | DDS_5 | I(n= 8) | DDS_4_2 | J(n= 3) |
| La | 108.43 | 91.81(24.29) | 19.76 | 15.75 | 84.36 | 70.25(23.97) | 33.03 | 26.10 | 76.03 | 33.72(11.12) | 10.89 | 8.39(3.85) |
| Ce | 211.65 | 159.82(18.91) | 49.06 | 39.07 | 178.61 | 150.50(41.72) | 75.83 | 55.90 | 148.66 | 64.56(19.15) | 22.24 | 17.30(3.45) |
| Pr | 26.24 | 17.74(4.04) | 6.90 | 4.99 | 20.01 | 18.45(4.74) | 11.27 | 8.03 | 16.52 | 7.85(2.06) | 3.28 | 2.67(0.76) |
| Nd | 77.08 | 58.89(12.25) | 22.42 | 19.51 | 66.89 | 57.45(12.23) | 40.66 | 27.50 | 47.92 | 28.41(7.55) | 10.72 | 10.65(2.37) |
| Sm | 13.14 | 10.02(2.01) | 5.39 | 5.24 | 14.61 | 13.25(1.20) | 15.22 | 8.17 | 8.55 | 7.44(1.44) | 4.20 | 5.20(1.57) |
| Eu | 0.85 | 0.92(0.14) | 0.11 | 0.13 | 1.00 | 0.64(0.34) | 0.02 | 0.21 | 0.78 | 0.41(0.20) | 0.06 | 0.14(0.12) |
| Gd | 10.81 | 8.92(1.60) | 5.15 | 5.92 | 15.43 | 11.65(0.35) | 19.98 | 9.59 | 7.34 | 7.78(1.50) | 4.27 | 6.57(2.60) |
| Tb | 1.75 | 1.22(0.25) | 0.98 | 1.14 | 2.85 | 2.13(0.01) | 4.84 | 2.22 | 1.12 | 1.31(0.25) | 0.91 | 1.41(0.54) |
| Dy | 8.89 | 7.70(1.17) | 6.01 | 9.09 | 17.42 | 12.15(0.64) | 30.19 | 15.80 | 6.50 | 8.41(1.68) | 6.06 | 10.54(4.54) |
| Ho | 1.82 | 1.72(0.26) | 1.33 | 2.30 | 3.36 | 2.36(0.11) | 6.26 | 3.39 | 1.20 | 1.68(0.36) | 1.17 | 2.13(0.92) |
| Er | 5.22 | 4.68(0.48) | 4.18 | 7.45 | 10.03 | 6.75(0.30) | 20.00 | 11.70 | 4.12 | 4.81(1.09) | 3.93 | 6.50(2.55) |
| Tm | 0.90 | 0.74(0.12) | 0.76 | 1.47 | 1.72 | 1.10(0.04) | 3.61 | 2.15 | 0.65 | 0.75(0.18) | 0.80 | 1.10(0.44) |
| Yb | 5.40 | 4.96(0.51) | 5.16 | 10.54 | 9.90 | 6.22(0.31) | 20.97 | 16.30 | 4.47 | 4.85(1.17) | 6.29 | 7.33(2.34) |
| Lu | 0.59 | 0.73(0.06) | 0.60 | 1.67 | 1.32 | 0.96(0.06) | 2.76 | 2.53 | 0.59 | 0.70(0.17) | 0.80 | 1.09(0.38) |
| ΣREE | 472.8 | 369.9 | 127.8 | 124.3 | 427.5 | 353.8 | 284.6 | 189.6 | 324.5 | 172.7 | 75.6 | 81.0 |
| LR/HR | 12.4 | 11.0 | 4.3 | 2.1 | 5.9 | 7.2 | 1.6 | 2.0 | 11.5 | 4.8 | 2.1 | 1.4 |
| δEu | 0.211 | 0.302 | 0.065 | 0.071 | 0.203 | 0.152 | 0.004 | 0.072 | 0.295 | 0.165 | 0.043 | 0.096 |
| La/Sm | 8.3 | 9.2 | 3.7 | 3.0 | 5.8 | 5.3 | 2.2 | 3.2 | 8.9 | 4.5 | 2.6 | 1.6 |
| Rb | 385.61 | 379.69(15.71) | 448.44 | 480.19 | 288.67 | 509.00(89.10) | 893.50 | 991.00 | 293.83 | 407.58(60.69) | 928.25 | 427.40(72.55) |
| Ba | 277.49 | 470.96(2.54) | 14.08 | 16.00 | 493.59 | 106.50(2.12) | 23.81 | 66.00 | 401.78 | 151.87(81.47) | 22.61 | 44.32(19.56) |
| Th | 84.29 | 69.00(1.24) | 55.60 | 41.78 | 69.24 | 33.65(0.64) | 59.96 | 35.50 | 48.54 | 46.91(6.77) | 13.80 | 28.85(11.68) |
| U | 26.45 | | 26.65 | | 17.85 | | 44.56 | | 12.14 | 15.77(4.27) | 21.13 | 27.12(23.54) |
| Nb | 41.79 | 56.87(31.96) | 34.84 | 52.43 | 33.18 | 17.70(1.56) | 63.55 | 41.40 | 16.49 | 19.32(3.42) | 53.34 | 43.69(22.80) |
| Ta | 4.35 | 4.07(0.25) | 5.23 | 6.80 | 2.94 | | 11.59 | | 2.24 | 3.70(0.59) | 15.56 | 10.06(5.72) |
| Sr | 97.08 | 136.06(26.97) | 19.92 | 11.40 | 61.95 | 33.90(15.84) | 7.33 | 12.60 | 86.39 | 39.03(19.30) | 10.36 | 11.06(3.36) |
| Hf | 7.93 | 7.5(0.63) | 3.66 | 10.45 | 9.71 | | 6.00 | | 5.59 | 5.01(0.47) | 2.39 | 8.39(5.64) |
| Zr | 223.87 | 313.80(32.34) | 75.53 | 214.25 | 310.47 | 76.05(7.14) | 111.54 | 101.00 | 191.63 | 119.03(15.78) | 30.89 | 108.20(65.56) |
| Y | 53.51 | 42.36(6.12) | 40.77 | 66.07 | 98.42 | 44.15(4.74) | 176.58 | 88.00 | 39.39 | 51.99(15.25) | 39.80 | 68.39(30.82) |
| Zr/Hf | 28.23 | 41.50 | 20.61 | 20.50 | 31.96 | | 18.60 | | 34.29 | 23.84 | 12.94 | 13.33 |
| Nb/Ta | 9.60 | 13.76 | 6.66 | 7.71 | 11.27 | | 5.48 | | 7.36 | 5.31 | 3.43 | 4.42 |
| Rb/Sr | 3.97 | 2.83 | 22.51 | 42.14 | 4.66 | 16.17 | 121.86 | 78.65 | 3.40 | 12.49 | 89.61 | 40.87 |
| Rb/Ba | 1.39 | 0.81 | 31.84 | 30.01 | 0.58 | 4.79 | 37.53 | 15.02 | 0.73 | 3.51 | 41.06 | 11.37 |
| Rb/Nb | 9.23 | 8.02 | 12.87 | 9.16 | 8.70 | 28.65 | 14.06 | 23.94 | 17.81 | 21.56 | 17.40 | 12.83 |

G(平均值)和II_6_2引自张佩华(2003) QH(平均值)和J43引自章邦桐等(2001);I和J(平均值)引自张敏等(2003);小括号内数据表示标准偏差。

接近,而3个补体的值差别较大。与各自主体相比,3个补体的Zr/Hf和Nb/Ta较低,而Rb/Sr和Rb/Ba明显较高。3个复式花岗岩体中的Rb/Nb为8.02~21.56,均高于地壳平均值(5.36, Rudnick and Fountain, 1995)。

3 云母类矿物化学特征

3个主体中的黑云母均较发育,为自形片状,包

裹早期结晶的副矿物(如锆石、榍石和磷灰石等)。但3个补体中的黑云母却不是同等发育,美华花岗岩中的黑云母含量较少,螃蟹木花岗岩中的黑云母含量稍多,在猪蹄石花岗岩中不发育黑云母。

黑云母电子探针化学成分分析投影结果(图7)表明:3个主体中的黑云母均贫镁富铁,为铁叶云母和铁质黑云母,镁铁指数MF变化较大,为0.11~0.67;而补体中的黑云母却不同,美华花岗岩中黑云母为铁叶云母,MF为0.08,螃蟹木花岗岩中的黑云母

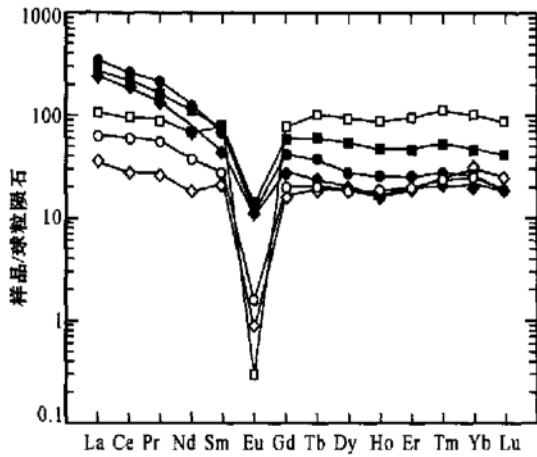


图4 复式花岗岩体球粒陨石标准化稀土元素配分模式
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns for composite granitic plutons
 球粒陨石标准化值据 Boynton(1984); 图例同图2
 Chondrite normalization values after Boynton (1984); Symbols as for Fig. 2

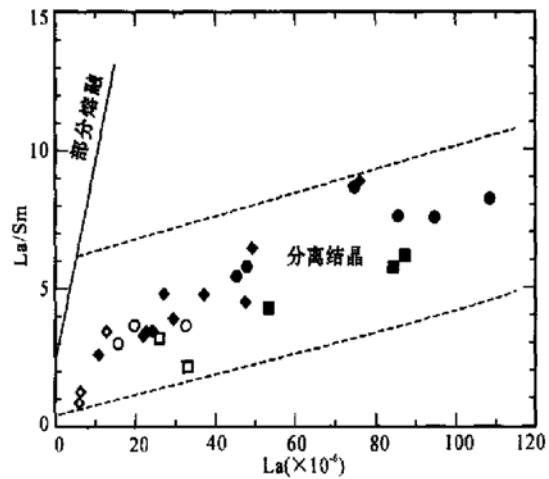


图5 复式花岗岩体 La/Sm - La 图解
 Fig. 5 La/Sm - La diagram for composite granitic plutons
 图例同图2
 Symbols as for Fig. 2

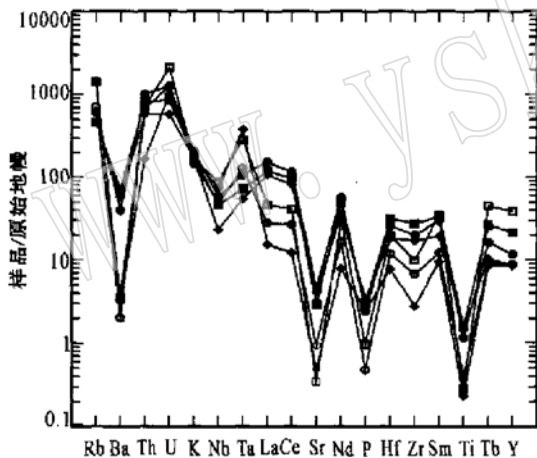


图6 复式花岗岩体微量元素图解
 Fig. 6 Trace element diagram for composite granitic plutons
 原始地幔标准化值据 McDonough 等(1992); 图例同图2
 Normalization values of primitive mantle after McDonough et al. (1992); Symbols as for Fig. 2

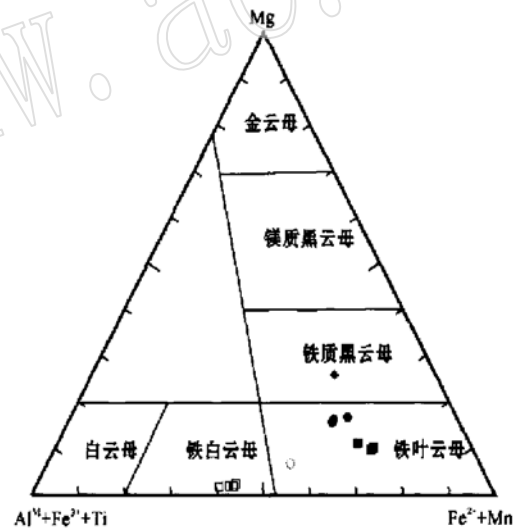


图7 复式花岗岩体中黑云母的分类图解(据 Foster, 1960)
 Fig. 7 Classification of biotites from composite granitic plutons (after Foster, 1960)
 图例同图2
 Symbols as for Fig. 2

为铁白云母, MF 为0.03。

据 Miller 等(1981)和 Roycroft(1991)提出的有关原生白云母岩相学的4点判别标准(即自形程度、相对粒度、反应结构和包裹物),将3个补体中的白云母进行分类:美华花岗岩中的白云母呈鳞片状,为次生白云母,细粒结构;螃蟹木花岗岩中的白云母相对复杂,原生白云母较多,而次生白云母较少,为细-中粒结构;猪蹄石花岗岩中的白云母非常发育,基本

上为原生白云母,一般为中粒结构。

4 讨论

上述岩石地球化学特征表明,3个主体的许多性质是相似的,而对应的3个补体的岩石学和地球化学特征却有很大的差别,这为利用3个补体的特征来建立复式花岗岩体的成因模式提供了研究基础。

3个主体的 A/CNK 值(0.997~1.066)及在 ACF 图中的投影(图2)显示它们基本上属于 S 型花岗岩,而 S 型花岗岩类在形成与演化过程中,部分熔融和岩浆的分离结晶作用决定了岩体的成因特征有所差异(徐克勤等,1989;Barbarin,1996;Chappell,1999;Clemens,2003)。

在 Nb/Ta-Nb 图(图8)上,3个复式花岗岩体的数据点均投影在上地壳平均值的右下方,且 Rb/Nb 均高于地壳平均值,显示它们的原始岩浆主要为地壳物质熔融而成(Hildreth *et al.*, 1991; Barth *et al.*, 2000)。在 La/Sm-La 图解(图5)上的投影,则显示它们均为岩浆分离结晶的产物。分离结晶作用是岩浆分异作用的一种主要方式,其实质就是随着岩浆温度的逐渐降低,从岩浆中结晶并分离出不同成分的矿物,从而使岩浆成分不断地发生变化。许多花岗岩复式岩体的补体正是主体花岗岩浆经过分离结晶作用而形成的残余岩浆上升、定位、冷凝而成的。当然,有的复式花岗岩体中补体和主体并不同源,补体岩浆和主体岩浆独立演化,最后侵位和冷凝的产物在空间上复合在一起。

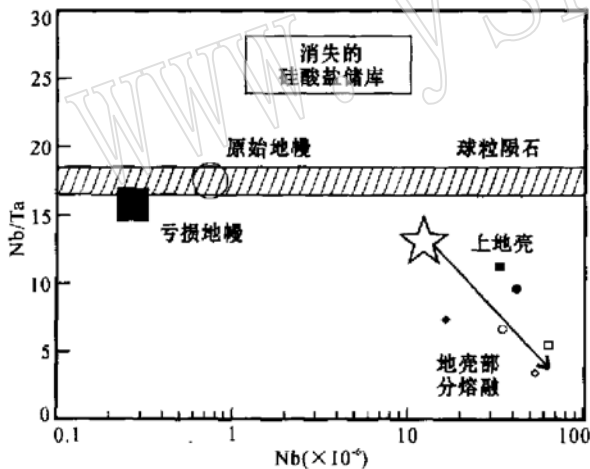


图8 复式花岗岩体 Nb/Ta-Nb 图解(据 Barth 等, 2000)

Fig. 8 Nb/Ta-Nb diagram of composite granitic plutons (after Barth *et al.*, 2000)

图例同图2

Symbols as for Fig. 2

4.1 花山复式花岗岩体

美华花岗岩的 Rb/Sr 年龄为 129.1 Ma, t_{Dm}^{Nd} 为 1380~1907 Ma, 而花山主体的 Rb/Sr 年龄为 164.7 Ma, t_{Dm}^{Nd} 为 768~984 Ma(朱金初等, 1988), 其侵位时间相隔 35.6 Ma, 远远超过一般花岗岩岩基的冷凝时间, 而主体和补体 Nd 亏损地幔模式年龄的不同

显示了二者的物源不同, 因此, 笔者认为美华花岗岩不可能是花山主体岩浆经过分离结晶作用形成的产物。以下的证据进一步表明, 美华花岗岩可能是与花山主体岩浆相似的岩浆经过分离结晶作用形成的残余岩浆上侵到花山主体中冷凝的产物。

4.1.1 岩石矿物学证据

在花山复式花岗岩体中, 由主体到补体, 暗色矿物(如黑云母和角闪石)减少或消失, 斜长石由 An 值较大的中-更长石演变为 An 值较小的更-钠长石, 钾长石由条纹长石演变为微斜长石, 补体中过铝质矿物(如白云母)和热液矿物(如萤石)的出现, 暗示了补体原始岩浆与主体岩浆的相似性及补体原始岩浆的强烈分异性。花山主体在空间上表现出明显的分带性, 即由边缘向中心, 岩体颗粒变粗, 由含角闪石的黑云母花岗岩演化为不含角闪石的黑云母花岗岩, 而且暗色矿物减少, 显示了主体自身岩浆分离结晶的特征。

4.1.2 地球化学证据

与花山主体相比, 美华花岗岩贫镁钙, 富硅富碱, 低 K_2O/Na_2O , 这些特征与由过铝质岩浆经过分离结晶作用衍生的残余岩浆的特征一致, 已经被 Scaillet 等(1995)在类似岩石上的实验所证实; 在微量元素上, 补体中 Ba、Sr、Eu 和 REE 较为贫乏, 而 Rb、U 和 Ta 则较为富集, 表明补体的形成经过了重要的分异过程(Pichavant *et al.*, 1988; Halliday *et al.*, 1991)。补体和主体在主量元素含量上差别明显, 但补体在哈克图解上的投影点如同位于主体投影点的延长线上, 主体和补体在配分模式上一致右倾, 在微量元素图解上的相似性, 暗示了二者之间有着相似的演化趋势。

借助岩性、主要氧化物的变化趋势和稀土元素配分模式等方面的资料, 对花山复式花岗岩和西欧伊比利亚半岛的 Jalama 侵入体进行对比研究发现, 花山主体与 Jalama 侵入体中的粗粒斑状花岗岩非常相似, 美华花岗岩与其内部的浅色细粒花岗岩基本类同, 而且主体和补体的对应关系一致。在 Jalama 侵入体中, 形成细粒花岗岩的母岩浆与形成粗粒花岗岩的岩浆相似, 但它们是不同源的(Ramirez and Grundvig., 2000), 由此暗示了美华花岗岩可能是与花山主体岩浆相似的异源岩浆经过分离结晶作用形成的残余岩浆上侵冷凝的产物。

4.2 金鸡岭和大东山复式花岗岩体

通过对金鸡岭复式花岗岩和大东山复式花岗岩

中主体和补体的矿物学和岩石地球化学的综合研究发现, 螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩分别为金鸡岭主体和大东山主体花岗质岩浆经过分离结晶作用形成的残余岩浆上升到主体花岗岩中定位、冷凝而形成的。

4.2.1 矿物学特征

从金鸡岭主体到螃蟹木花岗岩, 黑云母由多变少, 由铁叶云母演变为铁白云母, 白云母由无到有, 而且大多数为原生白云母, 斜长石由中-更长石演变为钠长石, 钾长石由条纹长石演变为微斜长石, 褐帘石由有到无; 从大东山主体到猪蹄石花岗岩, 黑云母由少到无, 白云母由少到多, 而且颗粒变大, 斜长石由更长石演变为钠长石, 钾长石由条纹长石(含少量微斜长石)演变为微斜长石, 且补体中出现了红柱石。上述现象表明, 从主体到补体, 暗色矿物减少, 浅色和过铝质矿物增多, 两者之间存在着分离结晶作用。

另外, 在两个补体中, 含有少量细粒他形萤石, 反映了残余岩浆向富水富F的演化趋势; 随着残余熔体F含量逐渐升高, 到晚期体系中不断升高的HF逸度对斜长石中的钙长石组分活度产生缓冲作用, 使残留熔体中只能结晶出钠质斜长石(熊小林等, 1996), 同时使钙长石组分变得不稳定而分解(Jerry and Robert, 1987; 李福春等, 2000), 分解的Ca与F结合形成萤石。这与复式花岗岩体中从主体到补体的矿物演化趋势一致。

4.2.2 主量元素的性质

在金鸡岭复式花岗岩和大东山复式花岗岩中, 补体和主体的组分相似, 在哈克图解上有所重叠, 暗示了两个复式花岗岩体中主体和补体的同源性; 两个复式花岗岩体在哈克图解上均显示较好的线性关系, 从主体到补体, A/CNK值由小于1.10到大于1.10, 在ACF图解(图2)中矿物组合的演变趋势相同, 则显示了两个复式花岗岩体的补体是由主体岩浆的分离结晶作用而来的。

4.2.3 稀土元素的性质

与各自主体相比, 螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩两个补体中的稀土元素总量和轻稀土元素总量明显降低, 而重稀土元素总量升高, Eu由中等负异常变为强烈的高负异常, 配分模式由右倾到“燕”形, 显示两个复式花岗岩体的主体和补体均为同源母岩浆分异演化的产物。补体中HREE的富集可能是由于流体分异和氟化物的形成共同造成的(Webb *et al.*,

1985; Dostal *et al.*, 1995), 实验证明岩浆晚期富F流体作用促使残余熔体中HREE富集(Ponader and Brown, 1989), 而氟化物(如萤石)中不仅强烈富集HREE, 还是HREE的主要载体(Ohlander *et al.*, 1989a, 1989b)。另外, 在金鸡岭复式花岗岩体中, 螃蟹木花岗岩中LREE的降低可能是金鸡岭主体岩浆中褐帘石分离结晶作用形成的(Mittlefehldt and Miller, 1983; Chesner and Ettliger, 1989)。

4.2.4 微量元素的性质

螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩中的Zr/Hf(分别为19和13)和Nb/Ta(分别为6和3)明显低于正常花岗岩的对应值(正常的花岗岩中, Zr/Hf值为33~40, Nb/Ta值约为11)(Green and Pearson, 1989; Green, 1995; Taylor and McLennan, 1985; Dostal and Chatterjee, 2000)。Zr/Hf值的降低, 可能是由于主体岩浆中锆石的分离结晶作用使分异岩浆中的Zr含量减少而造成的(Dostal and Chatterjee, 1995), Nb/Ta值降低则是结晶晚期富F流体的作用促使Ta的含量升高而形成的, 暗示了分离结晶作用的存在(Cerny *et al.*, 1986)。

两个补体中Ba、Sr、Zr降低和Rb、Rb/Ba、Rb/Sr升高暗示了由主体到补体岩浆结晶分异程度的加深(Whalen *et al.*, 1987), 因为在分离结晶的过程中, Ba的下降主要受其在钾长石中分配行为制约, 而Sr的下降则是两种长石共同作用的结果, Rb的升高是由Rb在矿物和熔体中的分配系数决定的(Mittlefehldt and Miller, 1983)。

5 结论

综上所述, 对南岭中、西段3个复式花岗岩的系统研究表明:

(1) 花山复式花岗岩体为两期独立的不同母岩浆演化的花岗岩组成, 而美华花岗岩补体可能经历了与花山主体岩浆相似的母岩浆分离结晶作用。

(2) 金鸡岭复式花岗岩体和大东山复式花岗岩体均为同一花岗质母岩浆分离结晶作用形成的产物, 即螃蟹木花岗岩和猪蹄石花岗岩为各自主体花岗质母岩浆经过分离结晶作用形成的残余岩浆冷凝而成, 主体和补体之间具有明显的继承关系。

(3) 上述两种不同产出方式的补体花岗岩, 可能与其主体岩浆的形成机制密切相关。

致谢 成文过程中就有关问题曾与周新民教授、孙涛博士和徐夕生教授进行过有益的探讨,特别是周新民教授给予笔者很多的启发,特此致谢!

Reference

- Barbarin B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids[J]. *Geology*, 24(4): 295~ 298.
- Barth M G, McDonough W F and Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165: 197~ 213.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~ 114.
- Cerny P, Goad B E, Hawthorne F C, *et al.* 1986. Fractionation trends of the Nb_ and Ta_bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatitic aureole, southeastern Manitoba [J]. *Am. Mineral.*, 71: 501~ 517.
- Channell B W. 1999. Aluminium saturation in I_ and S_ type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535~ 551.
- Chappell B W and White A J R. 1984. I_ and S_ type granites in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[A]. Xu Keqin and Tu Guangchi. *Geology of Granites and Their Metallogenic Relations* [C]. Beijing: Science Press, 87~ 101.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I_ and S_ type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh* [J]. *Earth Sciences*, 83: 1~ 26.
- Charoy B. 1986. The genesis of the Cornubian batholith (south west England): the example of the Carnmenellis pluton[J]. *J. Petrol.*, 27: 571~ 604.
- Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, *et al.* 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 8 (3): 293~ 307 (in Chinese with English abstract).
- Chesner C A and Ettlinger A D. 1989. Composition of volcanic allanite from the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia[J]. *Am. Mineral.*, 74: 750~ 758.
- Clemens J D. 2003. S_ type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth Science Reviews*, 61: 1~ 18.
- Dostal J and Chatterjee A K. 1995. Origin of topaz_bearing and related peraluminous granites of the Late Devonian Davis Lake pluton, Nova Scotia, Canada: crystal versus fluid fractionation[J]. *Chemical Geology*, 123: 67~ 88.
- Dostal J and Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton Nova Scotia, Canada [J]. *Chemical Geology*, 163: 207~ 218.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioclathedral micas[J]. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper, 354_B.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust_mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120: 347~ 359.
- Green T H and Pearson N J. 1989. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti_rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. *Geochemi. Cosmochim. Acta*, 51: 55~ 62.
- Halliday A N, Davidson J P, Hildreth W, *et al.* 1991. Modelling the petrogenesis of high Rb/ Sr silicic magmas[J]. *Chem. Geol.*, 92: 107~ 114.
- Hildreth W, Halliday A N and Christiansen R L. 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone Plateau volcanic field[J]. *J. Petrol.*, 32: 63~ 138.
- Jerry R W and Robert F M. 1987. Phase equilibria of a fluorine_rich leucogranite from the St. Austell pluton, Cornwall[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 51: 1591~ 1597.
- Jin Yuequn, Yuan Kuirong and Fang Qinghao. 1985. Origin, evolution and mineralization of Huashan granites, Guangxi[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 5(4): 295~ 305 (in Chinese with English abstract).
- Li Fuchun, Zhu Jinchu, Rao Bing, *et al.* 2000. New evidence for magmatic genesis of fluorite in the F_rich granite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(3): 224~ 227 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, *et al.* 2003. Origin of Nankunshan aluminous A_ type granite, Longkou County, Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1~ 10 (in Chinese with English abstract).
- Miller C F, Stoddard D F, Bradfish L J, *et al.* 1981. Composition of plutons muscovite: Genetic implications[J]. *Can. Mineral.*, 19: 25~ 34.
- Mittlefehldt D W and Miller C F. 1983. Geochemistry of the sweetwater wash pluton California: Implications for “anomalous” trace element behavior during differentiation of felsic magmas[J]. *Geochemi. Cosmochim. Acta*, 47: 109~ 124.
- Mo Zhusun, Ye Baidan, Pan Weizu, *et al.* 1980. *Geology of Granites in Nanling Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 115~ 187 (in Chinese).
- Ohlander B, Billstrom K and Halenius E. 1989a. Behaviour of rare-earth elements in highly evolved granitic system: Evidence from Proterozoic molybdenite mineralized aplites and associated granites in northern Sweden[J]. *Lithos*, 23: 267~ 280.
- Ohlander B, Billstrom K and Halenius E. 1989b. Geochemistry of the Proterozoic wolframite_bearing greisen veins and the associated granite at Rostberget, northern Sweden[J]. *Chemi. Geol.*, 78: 135~ 150.
- Pichavant M, Kontak D J, Herrera J V, *et al.* 1988. The Miocene_Pliocene Macusani volcanics, SE Peru: I. Mineralogy and magmatic evolution of a two_mica aluminosilicate_bearing ignimbrite suite[J]. *Contrib. Mineral. Petro.*, 100: 300~ 324.
- Ponader C W and Brown G E. 1989. Rare earth elements in silicate glass/melt systems, II. Interactions of La, Gd and Yb with halo-

- gens[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2905~ 2914.
- Ramirez J A and Grundvig S. 2000. Causes of geochemical diversity in peraluminous granitic plutons: the Jalama pluton, Central Iberian Zone (Spain and Portugal)[J]. *Lithos*, 50: 171~ 190.
- Roycroft P D. 1991. Magmatically zoned muscovite from the two_mica granites of Leinster batholith, Southeast Ireland[J]. *Geology*, 19: 437~ 440.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Rev. Geophys.*, 33: 267~ 309.
- Scaillet B, Pichavant M and Toux J. 1995. Experimental crystallization of leucogranite magmas[J]. *J. Petrol.*, 36: 663~ 705.
- Scheepers R. 1995. Geology, geochemistry and petrogenesis of Late Precambrian S₁, L and A₁ type granitoids in the Saldania belt, Western Cape Province, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 21(1): 35~ 58.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwells Scientific, 312.
- Webb P C, Tindle A G, Barritt S D, *et al.* 1985. Radiothermal granites of the United Kingdom: comparison of fractionation patterns and variation of heat production for selected granites[A]. *Inst. Min. Metall. High Heat Production (HHP) Granites, Hydrothermal Circulation and Ore Genesis*[C]. 409~ 424.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A₁ type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 407~ 419.
- Xiong Xiaolin, Zhu Jinchu and Rao Bing. 1996. Mineral equilibria in Ta-Nb granite and petrologic applications[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 32(1): 100~ 105 (in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Zhu Jinchu, Liu Changshi, *et al.* 1989. Genetic series and material sources of granitoids in south China[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences Edition)*, 3: 1~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Dai Yongshan, Wang Ju, *et al.* 2001. Geology and magma_dynamical features of Jinjiling composite granitic batholith in the western Nanling region[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 50~ 61 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengjiang. 1991. Discussion on the genetic type and metallogenic specialization for Guidong granite massif[J]. *Uranium Geology*, 7(4): 223~ 234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dadongshan granite pluton in mid Nanling Range[J]. *Geochemica*, 32(6): 529~ 539 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu and Li Xiangdong. 1988. Petrological-geochemical features and source materials of Huashan granite, Guangxi Autonomous Region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(1): 28~ 38 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. *高校地质学报*, 8(3): 293~ 307.
- 金跃群, 袁奎荣, 方清浩. 1985. 广西花山花岗岩体的成因、演化及矿化[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 5(4): 295~ 305.
- 李福春, 朱金初, 饶冰, 等. 2000. 富氟花岗岩中萤石岩浆成因的新证据[J]. *矿物学报*, 20(3): 224~ 227.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003. 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*, 22(1): 1~ 10.
- 莫柱荪, 叶伯丹, 潘维组, 等. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社. 115~ 187.
- 熊小林, 朱金初, 饶冰. 1996. Ta-Nb花岗岩的矿物平衡及岩石成因[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 32(1): 100~ 105.
- 徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 等. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源[J]. *南京大学学报(地科版)*, 3: 1~ 18.
- 张成江. 1991. 贵东岩体花岗岩的成因类型及成矿专属性探讨[J]. *铀矿地质*, 7(4): 223~ 234.
- 张敏, 陈培荣, 张文兰, 等. 2003. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因[J]. *地球化学*, 32(6): 529~ 539.
- 章邦桐, 戴永善, 王驹, 等. 2001. 南岭西段金鸡岭复式花岗岩基地质及岩浆动力学特征[J]. *高校地质学报*, 7(1): 50~ 61.
- 朱金初, 李向东. 1988. 广西花山花岗岩的岩石学和地球化学特征及成岩物质来源的探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 7(1): 28~ 38.