

黑鳞云母花岗质岩浆的结晶分异及钠长花岗质岩浆的形成

熊小林^{1,2} 饶冰² 朱金初² 赵振华¹ 王贤觉¹

XIONG XiaoLin^{1,2}, RAO Bing², ZHU JinChu², ZHAO ZhenHua¹ and WANG XianJue¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京 210093

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2000-09-04 收稿, 2001-08-12 改回.

Xiong XL, Rao B, Zhu JC, Zhao ZH and Wang XJ. 2002. Fractional crystallization of a protolithionite granitic magma and the formation mechanism of albite granitic melt. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 223—230

Abstract F-bearing leucogranitic rocks (Topaz granites) are a special type of felsic rocks enriched in fluorine and rare metal elements. They usually develop characteristic vertical zonation from a relatively potash and silica-high zone upward to a sodic and silica-low zone at the apical region of the plutons. In order to investigate their fractional crystallization process and the zonation mechanism, F-bearing protolithionite granite from the Xianghualing Pluton is used as the starting material to perform fractional crystallization experiments and to determine its crystallization sequence and melt differentiation trends at 150 MPa, 850~650°C and H₂O-unsaturated conditions. The run products include quartz, alkali-feldspar, mica and quenched glass. Quartz and alkali-feldspar are the first crystallized phases and are sequentially followed by mica. There are systematic variations in the compositions of alkali feldspar and residual melt compositions with decreasing run temperature. The contents of Or (KAlSi₃O₈) increase and the contents of Ab (NaAlSi₃O₈) and An (CaAl₂Si₂O₈) decrease. The most apparent fractionation trends in residual melt compositions are decreases in the contents of SiO₂ and K₂O, and increases in the contents of Na₂O, Al₂O₃, F, and the ratios of A/NKC and Na₂O/K₂O. At T ≤ 700°C, the residual melt has the compositional characteristics of natural F-rich albite granite. These experimental results indicate that the low-silica and sodic granitic melt could be derived by a relatively high-silica and potash F-rich leucogranitic magma via fractional crystallization, which is very important for the understanding of the fractional crystallization process and the zonation mechanism of F-bearing leucogranite plutons.

Key words F-bearing leucogranite, Fractional crystallization, Albite granitic melt, Experiments

摘要 以含F、过铝质、K₂O > Na₂O为特征的浅色黑鳞云母花岗岩为初始物,在P = 150 MPa, T = 850~650°C和H₂O不饱和条件下进行熔化-结晶分异实验,结果表明:首先晶出的是石英和富钾碱性长石;随结晶温度下降和结晶相含量的增加,残余熔体中挥发份F及Na₂O、Al₂O₃含量逐渐增加,SiO₂、K₂O、CaO含量减少,显示含F浅色花岗质熔体具有向贫硅富钠的富氟钠长花岗质熔体组成演化的趋势;700°C开始,残余熔体具有天然富氟钠长花岗岩的组成特征:富Na₂O(Na₂O > K₂O)、Al₂O₃(>16%)和F(>1.5%)。上述残余熔体组成的演化特征与自然界从含氟黑鳞云母花岗岩到富氟钠长花岗岩的组成变化规律是一致的,充分证明了在本文的实验条件下,含氟黑鳞云母花岗岩能够经结晶分异演化出富氟钠长花岗岩熔体。

关键词 含氟浅色花岗岩; 结晶分异; 钠长花岗质熔体; 实验

中图法分类号 P588.121; P584

* 国家自然科学基金(49973022、49873017)、中科院知识创新工程项目(KZCX2-102、KZCX2-SW-117)、国家重点基础研究项目(G1999043200)和南京大学成矿作用国家重点实验室国家教委访问学者项目。

第一作者简介: 熊小林,男,1963年生,研究员,实验地球化学和岩石学专业。

1 引言

具有 Ta、Sn、Li 等稀有元素矿化的富氟钠长花岗岩(锂氟花岗岩或黄玉花岗岩)遍布世界各地,尤以我国华南最为丰富和典型。由于这类花岗岩的重要经济价值及其成岩成矿机制的独特性,吸引了世界各国花岗岩与成矿关系研究者长期不懈的探索。众所周知,稀有元素矿化花岗岩体具有明显的分带特点,其主体通常为含氟黑鳞云母花岗岩,顶部为具有稀有元素矿化的富氟钠长花岗岩。关于富氟钠长花岗岩的成因,曾经争论不休:20世纪50年代至80年代初,流行的观点是“交代”说,即认为富氟钠长花岗岩是钠长石化的产物;80年代以来,随着富氟钠长花岗岩的火山、次火山类似物黄玉流纹岩和翁岗岩(Christiansen *et al.*, 1983; 杜绍华等,1988; Congdon *et al.*, 1991; Johnston *et al.*, 1992; 朱金初等,1993; 刘昌实等,1991; 王德滋等,1994)及石英、黄玉中熔融包裹体(夏卫华等,1984; Webster, 1997; 常海量等,1998)的发现以及其结构构造的研究(孙世华等,1990; 邹海波等,1991; 王联魁等,1983,1987,1997,1998; 朱金初等,1996,1998),交代观点逐渐为岩浆成因观点所替代。尤其是富氟花岗岩体系高温高压实验研究的进展(Manning, 1981; London *et al.*, 1989; 赵斌等,1995; 赵劲松等,1996; 熊小林等,1996,1997; Xiong *et al.*, 1999)进一步提供了富氟钠长花岗岩属岩浆成因的可靠依据。

尽管富氟钠长花岗岩属岩浆成因已很少有人怀疑,然而,对富氟钠长花岗岩岩浆的形成方式或过程又成为另外一个有争议的问题。是部分熔融(Christiansen *et al.*, 1983)? 液态分离(王联魁等,1983,1997)? 还是结晶分异(Pollard, 1995; 朱金初等,1998; Antipin *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2001)? 目前仍有争论。研究富氟钠长花岗岩浆的形成方式和过程,不仅对阐明富氟钠长花岗岩本身的成因,而且对于理解富氟钠长花岗岩中稀有元素的富集机理均是十分关键和重要的;结晶分异可能是富氟钠长花岗岩浆形成的一种最重要方式(Pollard, 1995; 朱金初等,1998),我们根据世界,特别是华南许多稀有元素矿化花岗岩体中富氟钠长花岗岩产于岩体顶部的地质事实,认为绝大部分富氟钠长花岗岩浆是含氟花岗岩浆极端结晶分异的产物。本文进行的水不饱条件下含氟黑鳞云母花岗岩质岩浆结晶分异作用实验结果,为富氟钠长花岗岩浆可能由结晶分异形成提供了可靠的实验依据。本文介绍这一实验成果。

2 实验方法

富氟钠长花岗岩以富 Na、Al、F 为特征,其 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,

$A/NKC > 1$ ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ 分子数之比), $F > 1.5\%$ 。尽管人造花岗岩($\text{Qz}-\text{Ab}-\text{Or}$)- $\text{H}_2\text{O}-\text{F}$ 体系中氟含量的增加导致最低共熔点向 Ab(钠长石)顶点移动(Manning, 1981),暗示富氟花岗岩浆结晶过程中残余熔体向富钠组成演化。但这种人造花岗岩体系是准铝质的,其 $A/NKC=1$; 它无法用来说明富氟钠长花岗岩 $A/NKC > 1$ 的特点,而这是富氟钠长花岗岩的特征过铝质矿物黄玉($\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{F}_2$)形成的必要条件。为阐明含氟、 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 、过铝的黑鳞云母花岗岩浆能够通过结晶分异形成富氟、 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 、高 A/NKC 的钠长花岗岩熔体,本文采用天然体系进行熔化-结晶实验,直接用稀有元素矿化花岗岩体主体相(或下部相)含氟黑鳞云母花岗岩作初始物来模拟其顶部相富氟钠长花岗岩的结晶分异成因。

2.1 实验初始物组成

实验样品取自湖南香花岭地区赖子岭岩体下部相含氟黑鳞云母花岗岩,岩石化学组成(%)为: SiO_2 , 75.31; TiO_2 , 0.02; Al_2O_3 , 13.76; Fe_2O_3 , 0.29; FeO , 1.34; MnO , 0.13; MgO , 0.09; CaO , 0.36; Na_2O , 3.83; K_2O , 4.78; P_2O_5 , 0.05; Li_2O , 0.16; F , 0.95; $\Sigma = 100.89$, 以含 F、过铝 ($A/NKC=1.20$)、 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 和贫 Fe、Mg、Ca 为特征,属含氟过铝浅色花岗岩。用黑鳞云母花岗岩粉末加蒸馏水(占试料 4%)作为初始物进行熔化-结晶分异实验。根据 Holtz (1993) 的实验,在本文进行的实验压力(150 MPa)条件下,4% H_2O 将不引起花岗质熔体产生 H_2O 过饱和,因此,实验是在 H_2O 不饱和条件下进行的。

2.2 压力和温度条件

实验压力为 150 MPa,对应于富氟花岗岩的高侵位环境($< 5\text{km}$);温度为 $850\sim 650^\circ\text{C}$ 。压力的测量采用管状弹簧压力表,其测量误差为 $50 \times 10^5 \text{ Pa}$;温度的测量采用铠装 RPK-103 铂铑热电偶,用 XTMA-1000 智能数字显示调节仪控温,并用 UJ36 型电位差计和标准热电偶校准,测温误差 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

根据近年来富氟花岗岩体系相关系实验结果(London *et al.*, 1989; Xiong *et al.*, 1999),在 $100\sim 200 \text{ MPa}$ 压力条件下,富氟花岗岩体系的固相线温度可以下降到近 500°C 。这样低的固相线温度是通过熔化实验获得的。由于结晶动力学问题,结晶实验很难在低温($< 600^\circ\text{C}$)达到平衡,所以本文的实验温度下限定为 650°C 。

2.3 实验过程和实验产物的分析测试

将实验初始物(黑鳞云母花岗岩粉末和蒸馏 H_2O 共 100 mg)装入外径 4mm,内径 3.8mm,长 40mm 的黄金管,焊前焊后均通过称量法检查焊封质量。实验在南京大学内生矿床

成矿机制研究国家重点实验室 RQV-旋转式快速淬火高温高压装置上完成。所有的实验均先在液相线以上 850℃ 恒温熔化 24 h, 产生均一含 H₂O 熔体, 然后将温度降至实验点恒温结晶 5 天以上后淬火。实验后再次通过称量法检查样品管密封质量。

为获得实验条件下的矿物结晶序列, 确定不同的矿物组合最早晶出的平衡温度是重要的。为此进行了两次二阶段逆

转实验(HP7 和 HP8, 见表 1): 第一阶段为结晶实验(方法同熔化-结晶实验), 其恒温度和时间根据已有的实验结果确定, 是最早能产生某一结晶相组合的温度和时间; 第二阶段升温 20℃, 再恒温熔化 4 天后淬火、称重。其结果用来检查熔化-结晶实验结果的可靠性和确定矿物组合最早晶出的平衡结晶温度。

表 1 实验条件和实验结果($P=150$ MPa, 初始 H₂O=4%)

Table 1 Experimental conditions and results ($P=150$ MPa, initial H₂O=4%)

实验号	温度(℃)	时间(h)	实验产物(相组合)	结晶相含量(%)
HP1	850	24	L	—
HP2	850, 820	24, 144	Q + Afs + L	1
HP7-1 *	850, 820, 840	24, 144, 196	L	—
HP3	850, 800	24, 126	Q + Afs + L	3
HP4	850, 750	24, 168	Q + Afs + L	38
HP8 *	850, 700, 720	24, 258, 97	Q + Afs + L	40
HP5	850, 700	24, 258	Q + Afs + Mi + L + V	56
HP6	850, 650	24, 285	Q + Afs + Mi + L + V	65

注: Q-石英; Afs-碱性长石; Mi-云母; L-液(熔)体相; V-蒸汽相; 标有 * 的实验为逆转实验。

淬火产物制成薄片和探针片进行详细的显微观察, 并用南京大学 JXA-8800M 电子探针分析结晶相和淬火玻璃的成分。用结晶硅酸盐作标样, 分析条件为: 加速电压 15 kV, 样品流 6~8 nA, 计数时间 6 s, 束斑直径 2 μm。为防止电子束轰击时 Na、K 的扩散导致 Na、K 分析误差, 在进行玻璃相成分分析时将束斑直径增大至 20 μm。

3 实验结果

3.1 结晶序列、结晶相比比例变化和结晶相组成

实验条件和结果见表 1。在 850℃ 条件下恒温熔化 24 小时, 淬火产物为透明玻璃(HP1), 表明在 850℃、150 MPa 和 4% H₂O 条件下, 黑鳞云母花岗岩能完全熔化。因此, 所有的结晶分异实验均是在熔体条件下结晶。淬火产物包括结晶相石英、长石和云母(少量)及玻璃相。所有的玻璃相均无色透明, 没有发现液相不混溶现象。当结晶相含量达 50% 以上时,

打开金管时出现自由水, 表明出现了饱和蒸汽相(HP5, HP6)。首先晶出的矿物组合为石英+长石, 其晶出温度为 820℃(HP2); 石英+长石+云母组合出现在 $T \leq 700$ ℃ 的实验产物中(表 1)。两次逆转实验分别导致石英+长石熔化消失(HP7-1)及云母消失(HP8), 表明熔化-结晶实验(HP2 和 HP5)没有产生较大过冷, 是在接近平衡的条件下结晶的, 因此可确定结晶序列为石英+长石→云母。镜下观察表明, 随着实验温度的下降和结晶作用的进行, 淬火玻璃中石英含量增加, 长石含量减小, 石英/长石(体积比)增加。电子探针分析(表 2)表明, 长石为由 Or (KAlSi₃O₈)、Ab (NaAlSi₃O₈) 和 An (CaAlSi₂O₈) 组成的碱性长石, 随实验温度的下降和结晶作用的进行, 其组成中 Ab 组分减小, Or 组分增加。云母的组成见表 2, 由 24 个氧为阴离子计算化学式, 其八面体配位阳离子数 $Al + Fe + Mn + Mg < 6$, 推测其组成中含 Li, 为黑鳞云母或铁锂云母。

表 2 实验产物的电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analysis results(%) of run products

实验号	HP1		HP3		HP4		HP5			HP6	
	温度(°C)	850	800	800	750	750	700	700	700	650	650
测定对象	玻璃(4)	长石(3)	玻璃(3)	长石(6)	玻璃(3)	长石(5)	云母(4)	玻璃(5)	长石(4)	云母(3)	玻璃(5)
SiO ₂	71.13	64.38	69.22	64.12	68.21	64.39	42.07	67.40	65.02	41.71	67.12
Al ₂ O ₃	13.61	19.94	13.88	20.08	14.01	19.45	21.43	15.20	19.24	20.67	16.12
FeO	1.80	—	1.91	—	2.53	—	18.86	1.81	—	24.29	0.85
MnO	0.03	—	0.09	—	0.09	—	0.67	0.03	—	0.15	0.02
MgO	0.02	—	0.08	—	0.07	—	0.27	0.02	—	0.35	0.02
CaO	0.42	1.41	0.46	1.61	0.31	1.01	0.08	0.24	1.10	0.04	0.16
K ₂ O	4.71	10.83	4.69	11.15	4.36	12.84	9.01	3.89	13.05	7.87	3.53
Na ₂ O	3.32	3.42	3.44	3.07	3.74	2.24	0.44	4.45	2.01	0.39	4.86
F	0.84	—	0.91	—	1.34	—	6.61	1.78	—	3.08	2.12
2F=O	-0.35	—	-0.38	—	-0.56	—	-2.77	-0.75	—	-1.29	-0.89
∑	95.53	99.98	94.32	100.03	94.10	99.93	96.65	94.07	100.42	97.26	93.91
Or		64		66		76			79		
Ab		29		26		19			16		
An		7		8		5			5		
Na ₂ O/K ₂ O	0.70		0.73		0.86			1.14			1.38
A/NKC	1.20		1.19		1.22			1.27			1.33

注:括弧中的数据为测点数。

3.2 淬火玻璃的组成、变化趋势及与天然富氟钠长花岗岩组成的比较

表 2 列出了与结晶相共存的淬火玻璃(残余熔体)组成的电子探针分析结果,被测玻璃的硅酸盐氧化物总量不足 100%是由于玻璃中含有电子探针不能检测的组分 H₂O 和 Li₂O。淬火玻璃的主要组分为 SiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO、Na₂O、K₂O、F,这些组分的含量随结晶温度下降显示出如下变化趋势(表 2 和图 1a-c): (1) Na₂O、Al₂O₃、F 含量随结晶温度下降增加。(2) SiO₂、K₂O、CaO 含量随结晶温度下降减小。(3) FeO(Fe₂O₃+FeO)含量先随结晶温度下降增加,随后其含量又因云母结晶而有所下降。(4) A/NKC 和 Na₂O/K₂O 随结晶温度下降增大(表 2)。这些变化规律表明含 F 的黑鳞云母花岗岩岩浆结晶分异总的趋势是导致残余熔体中挥发份 F 及 Na₂O、Al₂O₃ 含量逐渐增加, SiO₂、K₂O、CaO 含量减少,显

示含相对富硅和钾的含氟花岗岩熔体能演化出相对贫硅富钠的富氟钠长花岗岩熔体。

根据 Holtz 等(1993)对含氟花岗岩体系的实验结果,在 150MPa 和 F<3.11%条件下,人造花岗岩熔体中 H₂O 的溶解度为 5%左右。我们认为本文实验产物中淬火玻璃电子探针硅酸盐总量不足 100%主要是 H₂O 含量引起的。将淬火玻璃组成标准化到 100%,并与癞子岭富氟钠长花岗岩对比(表 3),不难看出,在 150MPa 的实验条件下,700℃开始,淬火玻璃(残余熔体)具有富氟钠长花岗岩的组成特征:富 Na₂O(Na₂O>K₂O)、Al₂O₃(>16%)和 F(>1.5%)。上述实验产物中残余熔体组成 SiO₂、K₂O 和 CaO 含量减少,Na₂O、Al₂O₃ 和 F 含量增加的变化特征也与自然界从黑鳞云母花岗岩到富氟钠长花岗岩的组成变化特点是一致的,充分证明了在本文的实验条件下,含氟黑鳞云母花岗岩能够经结晶分异演化出富氟钠长花岗岩熔体。

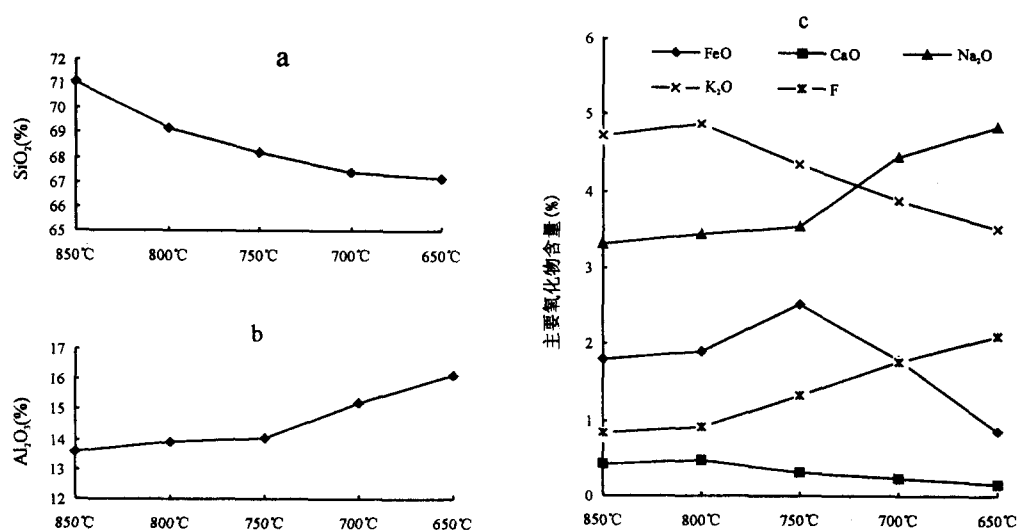


图 1-a, b, c— 淬火玻璃组成随温度下降的变化趋势

Fig. 1-a, b, c— Variation trend of quenched glass composition with decreasing temperature

表 3 淬火玻璃组成与富氟钠长花岗质组成的比较

Table 3 compositional comparison between the quenched glasses and F-rich albite granite

	癞子岭岩体		淬火玻璃(标准化到 100%)			
	黑鳞云母花岗岩	黄玉钠长花岗岩	800°C	750°C	700°C	650°C
SiO ₂	75.31	71.76	73.25	72.64	71.65	71.47
TiO ₂	0.02	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	13.76	15.98	14.69	14.92	16.16	17.17
FeO*	1.63	0.84	2.02	2.69	1.92	0.91
MnO	0.13	0.08	0.10	0.10	0.03	0.02
MgO	0.09	0.06	0.08	0.07	0.02	0.02
CaO	0.36	0.14	0.49	0.33	0.26	0.17
Na ₂ O	3.83	5.15	3.64	3.77	4.73	5.18
K ₂ O	4.78	3.87	5.17	4.64	4.14	3.76
P ₂ O ₅	0.05	0.01	—	—	—	—
Li ₂ O	0.16	0.21	未测	未测	未测	未测
F	0.95	1.76	0.96	1.43	1.89	2.26

* FeO=Fe₂O₃+FeO

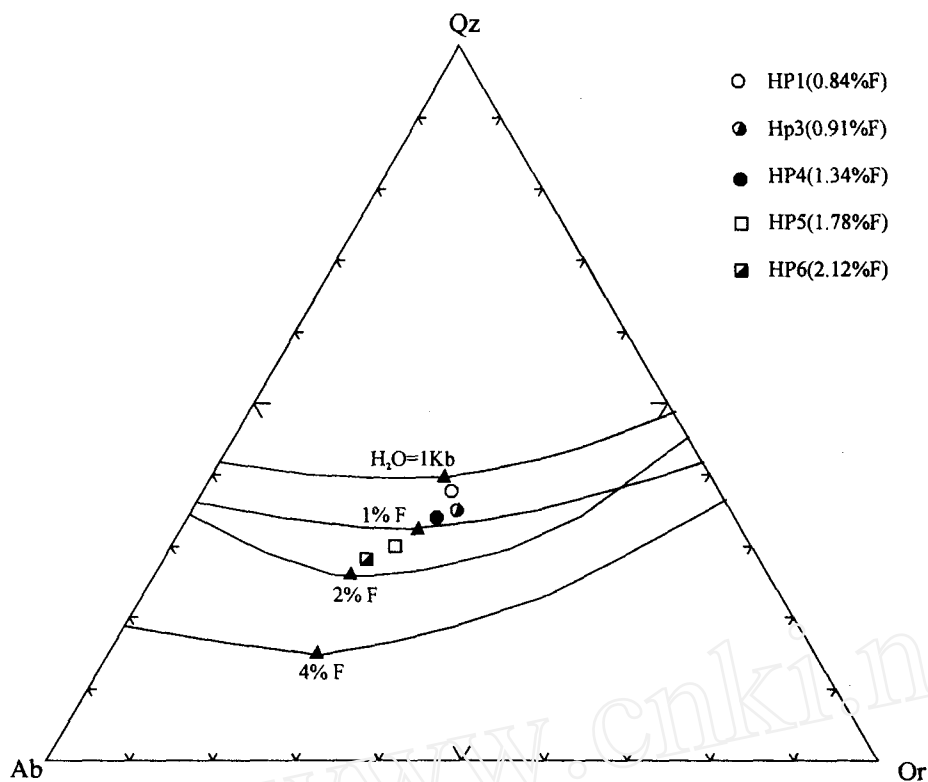


图2 残余熔体组成在 Qz-Ab-Or-F 体系三角相图中的投影

三角代表不同 F 含量条件下该体系的最低液相点或低共熔点,引自 Manning,1981

Fig. 2 Variation trend of residual melt compositions in the phase diagram of Qz-Ab-Or-F system

4 讨论

4.1 挥发分氟对残余熔体演化趋势的制约

挥发分是稀有元素矿化花岗岩的重要组成部分。大量的实验表明,氟在花岗质熔体中具有相当大的溶解度(Webster, 1990),它导致花岗质熔体的解聚作用,并降低其粘度和密度,加速结晶分异作用(Dingwell *et al.*, 1985, 1993)。F 在花岗质熔体中主要与 Al 和 Na 结合,破坏熔体相中钠长石组分($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)的结构(Manning, 1981),导致石英稳定域相对长石稳定域扩大,并使最低共熔点(残余熔体)向钠长石顶点移动(图 2, Manning, 1981)。本文实验的初始物黑鳞云母花岗岩含 F 近 1%,随着石英和碱性长石的首先晶出,残余熔体中氟含量不断增加;由于 F 对熔体相中钠长石组分的破坏作用,熔体相中钠长石组分活度减小,而石英和钾长石组分活度相对增加,因此,石英的晶出量增加,且碱性长石中

Or 组分增加,Ab 组分减少,必然导致残余熔体组成向 SiO_2 、 K_2O 减少, Na_2O 增加的方向演化(图 2)。此外,由于初始熔体组成是过铝质的,石英和长石的结晶作用将导致残余熔体过铝度(A/NKC)进一步增大,最终形成富 Na_2O 、 Al_2O_3 和 F 的钠长花岗岩熔体。

4.2 富氟钠长花岗质岩浆的成因

关于富氟钠长花岗质岩浆的成因,主要的观点有部分熔融,液态分离和结晶分异。部分熔融观点是基于黄玉流纹岩在北美大面积分布的事实提出的,Christiasen 等(1983)认为黄玉流纹岩岩浆(与富氟钠长花岗岩成分相当)是拉张背景条件下由下地壳部分熔融的产物,源区可能含铝硅酸盐(红柱石、兰晶石或夕线石)和黑云母,它们可以为部分熔融熔体提供所需要的过量 Al 和挥发份 F。液态分离是王联魁教授提出的,认为锂氟花岗岩中存在的许多结构构造(球粒、椭球状包体,条带和似层状构造)由岩浆液相不混溶形成(王联魁

等,1983,1987)。尔后又用液态分离观点解释锂氟花岗岩顶部带的成因(王联魁等,1997,1999)。

部分熔融实际上涉及到是否存在富氟钠长花岗质独立岩浆的问题,根据北美大陆广泛分布黄玉流纹岩,但不存在相对富钾母岩浆的事实,用部分熔融来解释这些黄玉流纹岩的起源是合理的。但用液态分离来解释钠长花岗质岩浆的成因,我们认为值得商榷。从 Webster(1990)的实验可知,花岗质熔体中氟溶解度达 7% 时仍未见液相不混溶现象。富氟钠长花岗质氟含量通常不超过 3%,特别是其主体相黑鳞云母花岗质氟含量几乎均不超过 1%,这样的挥发分条件下能产生液态分离形成钠长花岗质熔体是难以置信的。因此,我们认为液态分离不能解释富氟钠长花岗质岩浆的成因。但在富氟钠长花岗质岩浆结晶的最晚阶段,F 和 Li 可能在局部产生极端富集而导致液态分离形成一些球粒、椭球状包体,条带状结构构造。我国华南和世界各地(如英国康瓦尔、俄罗斯远东、法国中央高原)的稀有元素矿化富氟钠长花岗质均产于复式岩体的最晚阶段,并且常常具有明显的垂直分带特征;一些岩体(如广西栗木岩体,Zhu *et al.*,2001)从下部黑鳞云母花岗质至上部钠长花岗质能清楚观察到矿物组合的逐渐过渡,强烈支持钠长花岗质岩浆由结晶分异形成的观点。许多研究者(如 Pollard,1995;朱金初等,1998;Antipin *et al.*,1999;Zhu *et al.*,2001)认为结晶分异是富氟钠长花岗质岩浆形成的最主要方式。本文的实验结果有力地支持了富氟钠长花岗质岩浆由结晶分异形成的观点。

5 结论

以含 F、过铝质、 $K_2O > Na_2O$ 为特征的浅色黑鳞云母花岗岩为初始物,在 $P = 150 \text{ MPa}$, $T = 850 \sim 650^\circ\text{C}$ 和 H_2O 不饱和条件下进行熔化-结晶分异实验,获得如下重要结果和结论:

(1) 石英+碱性长石首先结晶,引起残余熔体中挥发组分 F 和 Al_2O_3 等含量的增加;随实验温度的下降和结晶作用的进行,F 含量的增加导致晶出的碱性长石组成中 Ab 组分减小,Or 组分增加,从而使残余熔体组成向 Na_2O 、 Al_2O_3 及 F 含量逐渐增加, SiO_2 、 K_2O 含量减少的方向演化。

(2) 随结晶温度下降和结晶相含量的增加,700℃开始,淬火玻璃(残余熔体)具有富氟钠长花岗质的组成特征:富 Na_2O ($Na_2O > K_2O$)、 Al_2O_3 ($> 16\%$) 和 F ($> 1.5\%$),A/NKC 增加到 1.33。实验产物中残余熔体组成 SiO_2 、 K_2O 和 CaO 含量减少, Na_2O 、 Al_2O_3 和 F 含量增加的变化特征与自然界从黑鳞云母花岗岩到富氟钠长花岗岩的组成变化特点是一致的,充分证明了在本文的实验条件下,含氟黑鳞云母花岗岩能够经结晶分异演化出富氟钠长花岗岩熔体。

致谢: 手稿完成过程中得到王联魁研究员和赵斌研究员的指教,笔者表示衷心的感谢!

References

- Antipin V S, Savina E A, Mitichkin M A, Perelyaev V I. 1999. Rare-metal lithium-fluorine granites, ongonites and topazite of the Southern Baikal Region. *Petrology*, 7: 147-159
- Chang H L, Huang H L. 1998. Melt-fluid inclusions in the topazes of pagmatite in Jianfengling. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(1):81-87 (in Chinese with English abstract)
- Christiansen E H, Burt D M, Sheridan M F, Wilson R T. 1983. The petrogenesis of topaz rhyolites from the western Unites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83: 16-30
- Congdon R D, Nash W P. 1991. Eruptive pegmatite magma: rhyolite from the Honeycomb Hills, Utah. *Am. Mineral.*, 76: 1261-1278
- Dingwell B D, Knoche R, Webb S L. 1993. The effect of F on the density of haplogranite melt. *Am. Mineral.*, 78:325-330
- Dingwell D G, Scarfe C M, Cronin D J. 1985. The effect of fluorine on viscosity in the system $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$: Implications for phonolites trachytes and rhyolites. *Am. Mineral.*, 70:80-87
- Du S H, Huang Y H. 1984. The study on Xianghualing rocks. *Science in China (series B)*, 11, 1039-1047 (in Chinese with English abstract)
- Holtz F, Dingwell D B, Behrens H. 1993. Effects of F, B_2O_3 and P_2O_5 on the solubility of water in haplogranite melts compared to natural silicate melts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 113:492-501
- Johnston C, Chappell B W. 1992. Topaz-bearing rocks from Mount Gibson, North Queensland, Australia. *Am. Mineral.*, 77:303-313
- Liu C S, He B C, 1991. A preliminary investigation on petrogenesis of the topaz-bearing igneous rocks in the southeastern Jiangxi Province. *Journal of Nanjing University (Earth Science)*, (3): 220-230 (in Chinese with English abstract)
- London D, Morgan G B, Hervig R L. 1989. Vapor-undersaturated experiments with Macusani glass + H_2O at 200 MPa and the internal differentiation of granitic pegmatites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 102:1-17
- Manning D A C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 Kb. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76: 206-215
- Pollard P J. 1995. Geology of rare metal deposits: An introduction and overview. *Economic Geology*, 90: 489-494
- Sun S H, Yu J. 1990. The structure of Ta-bearing granites. *Chinese Science Bulletin*, 35(9):687-689
- Wang D Z, Liu C S, Sheng W Z. 1994. The geochemistry and genesis of topaz porphyry in Taixun, Zhejiang Province. *Geochimica*, 23(2): 115-125 (in Chinese with English abstract)
- Wang L K, Huang H F, Huang Z L. 1997. Discovery on the three

- end-member components of Li-F granite rock and its liquid-state segregation origin. *Geology and Prospecting*, 33(3):11-20 (in Chinese with English abstract)
- Wang L K, Huang H F, Huang Z L. 1999. The geochemical indicatrixes of the REE in Li-F granite liquid segregation. *Acta Petrologica Sinica*, 15(02):170-180 (in Chinese with English abstract)
- Wang L K, Lu J L. 1987. Experimental investigation on the liquid segregation of granite in south China. *Science in China (series B)*, (1):79-87 (in Chinese with English abstract)
- Wang L K. 1983. Liquid segregation — a way of granitic magma in South China. *Geology Review*, 29(4):365-373 (in Chinese with English abstract)
- Webster J D. 1990. Partitioning of F between H₂O and CO₂ fluids and topaz rhyolite melt, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104:424-438
- Webster J D. 1997. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: Geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorous-rich residual liquidus. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2589-2604
- Xia W H, Chen Z Y. 1984. The melt inclusions in topaz and quartz and their application on the genesis of Ta, Nb granite in South China. *Earth Science*, 2, 76-83 (in Chinese with English abstract)
- Xiong X L, Zhao Z H, Zhu J C, Rao B. 1999. Phase relations in albite granite-H₂O-HF system and their petrogenetic applications. *Geochemical Journal*, 33(3):199-214
- Xiong X L, Zhu J C, Rao B. 1996. The mineral equilibria and petrogenesis of Ta, Nb granite. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 32(1):100-105 (in Chinese with English abstract)
- Xiong X L, Zhu J C, Rao B. 1998. Phase equilibria in the albite granite-H₂O-HF system and the effect of fluorine on granitic melt structure. *Chinese Journal of Geochemistry*, 17(2):114-122
- Zhao B, Wang S Y, Wu H Z, Liu Z Y. 1995. *Experimental Geochemistry at High Temperature and Pressure*. Beijing: Science Press, 167-194 (in Chinese with English abstract)
- Zhao J S, Zhao B, Rao B. 1996. An experimental investigation on the partitioning of Ta, Nb, W among crystal, melt and fluid during the crystallization of albite granitic magma. *Chinese Science Bulletin*, 41(15):1413-1415
- Zhu J C, Li L K, Zhou F Y. 1996. The genesis of dissymmetrical layered pegmatite-aplite dykes in Shui Ximiao, Limu, Guangxi Province. *Geochimica*, (1):1-10 (in Chinese with English abstract)
- Zhu J C, Li R K, Li F C, Xiong X L. 2001. Topaz-albite granites and rare-metal mineralization in the Limu district, Guangxi Province, Southeast China. *Mineralium Deposita*, 36:393-405
- Zhu J C, Liu W X, Zhou, F Y. 1993. Ongonite and topazite in dyke No. 431 of Xianghualing district and their spatial zonation and genetic relationship. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2), 158-166 (in Chinese with English abstract)
- Zhu J C, Rao B, Li F C. 1998. The geological and geochemical evidences of residual melt of Li, F-rich rare metal granites. *Mineral Deposits*, 17 (suppl.): 567-570 (in Chinese with English abstract)
- Zou H B, Xun H W, Zhou X M. 1991. The genesis of snow-ball structure in Ta-bearing granite. *Chinese Science Bulletin*, 36(16):1245-1247

附中文参考文献

- 常海亮, 黄惠兰. 1998. 尖峰岭似伟晶岩内黄玉中的熔流包裹体. *岩石矿物学杂志*, 17(1):81-87
- 杜绍华, 黄蕴慧. 1988. 香花岭岩的研究. *中国科学 B 辑*, (11): 1039-1047
- 刘昌实, 贺伯初. 1991. 赣东南含黄玉岩浆岩成因议, *南京大学学报(地球科学)*, (3):220-230
- 孙世华, 于洁. 1990. 钽花岗岩结构. *科学通报*, 35(9):687-689
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭州. 1994. 浙江泰顺浙滨黄玉斑岩的地球化学特征和成因. *地球化学*, 23(2):115-125
- 王联魁, 卢家烂. 1987. 南岭花岗岩液态分离的实验研究. *中国科学 B 辑*, (1):79-87
- 王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 1999. Li-F 花岗岩液态分离的稀土地球化学标志. *岩石学报*, 15(2):170-180
- 王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 1997. 锂氟花岗质岩石三端员组分的发现及其液态分离成因. *地质与勘探*, 33(3):11-20
- 王联魁. 1983. 液态分离——南岭花岗岩分异方式之一. *地质论评*, 29(4):365-373
- 夏卫华, 陈紫英. 1984. 黄玉、石英中熔浆包裹体的发现及其在华南钽铌花岗岩成因上的意义. *地球科学*, 25(2): 79-83
- 熊小林, 朱金初, 饶冰. 1996. Ta、Nb 花岗岩的矿物平衡及岩石成因. *南京大学学报(自然科学)*, 32(1):100-105
- 熊小林, 朱金初, 饶冰. 1997. 钠长花岗岩-H₂O-HF 体系相关性及 F 对花岗质熔体结构的影响. *地质科学*, 32(1):1-10
- 赵斌, 王声远, 吴厚泽, 刘正义. 1995. 高温高压实验地球化学. 北京: 科学出版社, 167-194
- 赵劲松, 赵斌, 饶冰. 1996. Ta、Nb、W 在钠长花岗岩岩浆结晶分异过程中于各相间分配行为的实验研究. *科学通报*, 41(15):1413-1415
- 皱海波, 徐洪武, 周新民. 1991. 钽花岗岩中雪球结构的成因研究. *科学通报*, 36(16):1245-1247
- 朱金初, 李人科, 周凤英. 1996. 广西栗木水溪庙不对称层状伟晶岩-细晶岩岩脉的成因讨论. *地球化学*, (1):1-10
- 朱金初, 刘伟新. 香花岭 1993. 431 岩脉中翁岗岩和黄英岩的空间分带和成因联系. *岩石学报*, 9(2):158-166
- 朱金初, 饶冰, 李福春. 1998. 富锂氟含稀有矿化花岗质残余熔体的地质和地球化学证据. *矿床地质*, 17(增刊):567-570