

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

华南富氟花岗岩高磷和低磷亚类型对比

黄小龙 王汝成 陈小明 陈培荣 刘昌实

(南京大学地球科学系, 成矿作用国家重点实验室, 210093)

内容提要 根据全岩 P_2O_5 含量的多寡可将华南富氟花岗岩分为高磷亚类和低磷亚类, 它们之间具较大的地球化学差异。高磷亚类以低硅、强过铝和低的 REE 总量为特征, 而低磷亚类则相反。在长石、云母等矿物化学成分上这两亚类花岗岩也有所差异。高磷亚类花岗岩中磷以长石中结构磷和磷铝锂石形式存在, 而低磷亚类花岗岩中的磷则主要存在于磷灰石等磷酸盐矿物中。

关键词 富氟花岗岩 高磷亚类型 低磷亚类型 华南

氟在酸性岩中平均含量为 0.08%, 若全岩氟含量 $>0.2\%$ 便可称为富氟长英质体系^[1]。由于氟对花岗岩熔体的影响, 使得富氟花岗岩和花岗伟晶岩在岩石学和矿物学上具特殊的特征。本文所探讨的富氟花岗岩均为过铝质, 含岩浆成因黄玉。富氟长英质岩石由于与 Sn、W、Nb、Ta、Be、U、稀土等斑岩-热液型矿床有密切的时空联系, 而引起地质学家们的重视。国内外学者^[1~14]曾先后对富氟长英质体系的岩石学、地球化学以及高温高压模拟实验等做了许多卓有成效的研究, 并取得丰硕成果。近年来, London^[13], Taylor 等^[15]通过对许多岩体的对比, 注意到富氟长英质体系存在两种地球化学性质反差很大的亚类型: 一种是高 P_2O_5 的, 以 $P_2O_5 > 0.4\%$ 、 $Al_2O_3 > 14.5\%$ 、 $SiO_2 < 73\%$ 、很低含量的 REE、Y 和 Th 为特征; 另一种是低 P_2O_5 的, 以 $P_2O_5 < 0.1\%$ 、 $Al_2O_3 < 14.5\%$ 、 $SiO_2 > 73\%$ 、较高含量的 REE、Y 和 Th 为特征。华南出露有许多富氟花岗岩体, 经笔者对比后, 也能区别出上述两种亚类型。高 P_2O_5 亚类型, 如江西宜春雅山岩体和广西栗木岩体; 低 P_2O_5 亚类型, 如江西岩背岩体、赣南三标岩体、湖南癞子岭和千里山岩体等。它们之间的地球化学特征差异与国外的典型岩体非常相似。结合对前人研究资料的归纳、总结, 笔者试图对华南富氟花岗岩中高磷与低磷亚类型作一岩石地球化学、矿物学方面的对比, 初步探讨造成它们之间重大反差的地球化学机理。

1 岩体概况

1.1 高磷亚类型

(1) 江西雅山岩体 江西宜春雅山岩体位于华南江南古岛弧中段武功山混合岩—花岗岩穹窿区。雅山岩体为一复式岩体, 出露面积 9.5 km^2 , 岩体可分为 5 种花岗岩类型: ①中粗粒黑鳞母-白云母花岗岩; ②细粒斑状白云母花岗岩; ③中粒白云母花岗岩; ④锂云母花岗岩; ⑤黄玉锂云母花岗岩^[16]。②、③发生 W 矿化, ④、⑤发生 Nb、Ta 矿化, 为雅山 Ta-Nb 矿的主体。

(2) 广西栗木水溪庙岩体 水溪庙岩体为栗木复式花岗岩体中一个最晚阶段形成的岩株。

注: 本文为国家自然科学基金(编号 49673183, 49632080)资助项目。

本文 1997 年 10 月收到, 1998 年 4 月改回, 刘淑春编辑。

本身自上而下可分为6个带:萤石-锂云母细脉带;长石-石英脉带;伟晶岩-细晶岩岩脉带;富钠长石黄玉花岗岩带;中钠长石花岗岩带;钠长石-微斜长石花岗岩带等^[9]。水溪庙岩体主要与Ta、Nb、Sn矿化作用有关。

1.2 低磷亚类型

(1)江西岩背岩体 江西会昌岩背火山侵入杂岩是多旋回岩浆活动的产物。王德滋等^[17]将其划分为3个旋回,第一旋回主体岩浆活动又分为4个阶段,其中第三阶段由浅成相含黄玉花岗斑岩和中深成相含黄玉花岗岩组成,第四阶段为云母黄英岩或黄英斑岩。岩背杂岩赋存大型斑岩型锡矿床。

(2)赣南三标岩体 赣南三标复式花岗岩基由三标、帽子顶、铜坑嶂3个岩体组成。三标岩体位于江西寻乌县三标附近,主要岩性为粗粒—中粗粒巨斑状黑云母花岗岩,部分边缘相为微粒至细粒斑状黑云母花岗岩;帽子顶岩体以中粗—中粒似斑状黑云母花岗岩为主;铜坑嶂岩体为一超浅成、近地表、具隐爆特点的斑岩体。帽子顶、铜坑嶂岩体具Sn、W矿化^[18, 19]。

(3)湖南癞子岭(香花岭)岩体 为一多期多阶段复式岩体中最晚阶段形成的岩体,具有明显的垂直分带。自顶部向下400 m范围可划分为:黄玉铁锂云母伟晶岩带、黄玉铁锂云母块状石英岩带、层状云英岩带、块状云英岩带、钠长石花岗岩和钠长微斜长石花岗岩带,黑鳞云母花岗岩带等。癞子岭岩体主要具W、Sn、Be矿化^①。

(4)湖南千里山(野鸡尾)岩体 千里山岩体是一个由多期多阶段侵入体组成的复式岩体,根据其侵入关系及同位素年龄可将其划分3个侵入阶段^[20]。岩性组成主要为黑云母二长花岗岩和含锡斑岩。野鸡尾斑岩锡矿与江西岩背斑岩锡矿等都以富含岩浆成因黄玉为特征。

以上华南各富氟花岗岩体都是岩浆演化至晚阶段的产物。其中高磷亚类的岩体(江西宜春、广西栗木)大多与Nb、Ta矿化有关,部分具Sn、W成矿作用;而低磷亚类的岩体(江西岩背、赣南三标、湖南癞子岭、千里山)则主要发生Sn、W、Be矿化作用。

2 矿物学特征

2.1 长石

低磷亚类富氟花岗岩的斜长石主要为更长石,部分为钠长石,如:三标岩体斜长石 $An=20\sim 25$;帽子顶岩体斜长石 $An=18\sim 23$;铜坑嶂岩体斜长石 $An=8\sim 20$ ^[19];岩背花岗岩斜长石 $An=20$ ^[21];花岗斑岩斜长石 $An=0.1$ (表1);癞子岭岩体斜长石 $An=3$ 。高磷亚类的斜长石几乎都为原生钠长石,如:栗木岩体绝大部分斜长石的 $An=0\sim 5$;雅山岩体晚阶段的含矿岩体中斜长石绝大部分为 $An=0\sim 3$ (表1)。以上这些岩体中的斜长石都为原生,或为自形斑晶,或为细板状基质。有时可见钠长石在石英、钾长石斑晶中构成“雪球结构”^[7]。

由于富氟花岗岩是高度演化的残余岩浆在低温下结晶形成的,其钾长石除个别外,多数是Al/Si有序化的微斜长石。低磷亚类中帽子顶岩体和三标岩体的钾长石属最大微斜长石;千里山花岗岩从早期到晚期,随着演化程度逐渐增高,钾长石的有序度逐渐增大,从中微斜长石变为最大微斜长石;癞子岭岩体中钾长石具较高的有序度, δ 均 >0.85 ,三斜度 >0.83 ,也为最大微斜长石;岩背岩体钾长石斑晶为Al/Si有序度也很高的最大微斜长石^[21]。高磷亚类中水溪庙岩体钾长石为三斜度、有序度均较高的最大微斜长石;雅山岩体自下部到顶部的伟晶岩壳部

① 周凤英. 华南某些富氟花岗岩岩浆—热液过渡阶段的地球化学研究. 南京大学博士论文. 1994.

分,其中钾长石的三斜度和有序度总体而言是逐渐升高的,有序度基本上>0.80,主要为高有序的微斜长石。因此,华南富氟花岗岩不论高磷亚类或者低磷亚类,其钾长石都是 Al/Si 有序的微斜长石,表明它们都形成在低温环境中。

表 1 华南部分富氟花岗岩斜长石与钾长石化学成分(%)

Table 1 The chemical compositions (%) for plagioclase and K-feldspar of some F-rich granites in South China

长石类型	斜长石					钾长石					
亚类型	高 磷			低 磷		高 磷				低 磷	
地 点	雅山 2	栗木 1	栗木 2	岩背	癞子岭	雅山 1	雅山 2	栗木 1	栗木 2	岩背	癞子岭
样品数	2	9	6	2	3	7	2	10	6	2	2
SiO ₂	68.26	67.95	68.48	68.24	68.18	63.93	63.74	64.59	63.92	64.02	65.11
Al ₂ O ₃	19.91	19.97	20.45	19.77	19.76	18.33	19.35	18.45	19.64	19.32	19.00
FeO	0.00	0.00		0.00	0.06	0.05	0.00	0.00		0.00	0.08
MgO	0.00	0.02		0.00	0.01	0.09	0.00	0.01		0.00	0.05
CaO	0.18	0.11	0.05	0.02	0.18	0.15	0.00	0.06	0.38	0.01	0.10
Na ₂ O	10.93	11.29	10.60	11.52	11.19	1.65	0.24	1.02	0.18	0.22	1.42
K ₂ O	0.15	0.33	0.18	0.21	0.32	13.46	15.84	15.05	15.53	15.78	14.05
P ₂ O ₅	0.38	—	0.20	0.00	0.00	—	0.20	0.16	0.18	0.00	0.00
总量	99.81	99.68	99.96	100.00	99.68	97.66	99.37	99.18	99.83	99.35	99.79
O=8											
Si	2.99	2.98	2.98	2.99	2.99	2.99	2.96	3.00	2.96	2.97	2.99
Al	1.03	1.03	1.05	1.02	1.02	1.01	1.06	1.01	1.07	1.06	1.03
Ca	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
Na	0.93	0.96	0.90	0.98	0.95	0.15	0.02	0.09	0.02	0.02	0.13
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.80	0.94	0.89	0.92	0.93	0.83
Ab	98.4	97.7	98.7	98.7	97.4	15.6	2.3	9.3	1.7	2.1	13.2
An	0.8	0.5	0.2	0.1	0.8	0.8	0.0	0.3	2.0	0.0	0.5
Or	0.8	1.8	1.1	1.1	1.8	83.6	97.7	90.4	96.3	97.9	86.3

注:资料来源:(1)斜长石的栗木 1 和癞子岭引自周凤英.华南某些富氟花岗岩岩浆—热液过渡阶段的地球化学研究.南京大学博士论文,1994;(2)钾长石的栗木 1 引自甘晓春.栗木小溪庙锡钨钼矿化花岗岩及矿床成因.南京大学硕士论文,1989;雅山 1 引自曹晓云.江西宜春 414 钨钼矿床成矿规律的研究.南京大学硕士论文,1982;癞子岭引自文献[2];(3)其它为本文提供,由南京大学成矿作用国家重点实验室 JXA8800M 型电子探针仪测试,测试条件为加速电压 15kV,电流 10nA,WDS 1μm;“—”表示未测。

高磷亚类花岗岩的长石矿物是磷的主要贮体,磷以磷锂铝石微包裹体的形式或主要经“Al+P $\leftrightarrow$ 2Si”的替换方式进入长石矿物中。如英国 Cornwall 花岗岩钾长石中平均含 P₂O₅ 0.6%,斜长石中含 P₂O₅ 0.4%^[13]。我国花岗岩长石中 P₂O₅ 含量测定尚未广泛展开,资料奇缺,但前人在栗木岩体钾长石中检测到了 P₂O₅,平均达 0.16%(表 1);雅山岩体钠长石中含 P₂O₅ 0.3%^[22]。笔者也对雅山岩体和栗木岩体的长石矿物进行磷的检测,结果为斜长石的 P₂O₅ 平均含量分别为 0.38%和 0.20%,钾长石的 P₂O₅ 平均含量分别为 0.20%和 0.18%(表 1),表明华南亦有富氟高磷岩体。而在任何低磷亚类岩体的长石矿物中 P 含量低于电子探针检测灵敏度,磷的主要载体是副矿物磷灰石。

2.2 黄玉

黄玉是过铝富氟花岗岩的特征造岩矿物。华南富氟花岗岩各岩体的晚期阶段都含数量不等的黄玉,其产出特征为:①在斑状岩石中少数呈自形斑晶出现;②呈细小自形柱状颗粒与其他副矿物一起被石英和钾长石包裹;③呈他形填隙矿物充填在长英质矿物之间;④细针状产于斑状岩石基质中。这表明黄玉为岩浆晚阶段至气成阶段结晶的原生矿物^[18, 21]。

刘昌实等^[21]对低磷亚类岩背花岗岩、花岗斑岩和黄英岩中黄玉作了电子探针成分分析, 计算所得结构式分别为: $\text{Al}_{2.04}(\text{Si}_{0.97}\text{O}_4)(\text{F}_{1.74}\text{OH}_{0.26})$ 、 $\text{Al}_{2.00}(\text{Si}_{0.99}\text{O}_4)(\text{F}_{1.91}\text{OH}_{0.19})$ — $\text{Al}_{2.03}(\text{Si}_{0.97}\text{O}_4)(\text{F}_{1.97}\text{OH}_{0.03})$ 和 $\text{Al}_{2.03}(\text{Si}_{0.98}\text{O}_4)(\text{F}_{1.97}\text{OH}_{0.03})$, 其 F/OH 值(1.97~1.72):(0.26~0.03), 接近 2:0。表明岩背花岗岩中黄玉成分接近氟黄玉端员, 为富 F 岩浆晚期结晶的原生黄玉。

据 Rosenberg^[23]的 AlF_3 - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O 四元系平衡实验, 在 200 MPa 压力下, 黄玉 F/OH 值是温度的线性函数。在 900~500℃ 时, 形成的主要是富 F 黄玉(岩浆结晶); 在低于 500℃ 时, 主要形成富 OH 黄玉(热液蚀变)。因而岩背花岗岩中黄玉形成温度应高于 500℃。

2.3 云母类矿物

华南富氟花岗岩中云母是富 Li、F 和 Al 种属。按 Foster^[24]分类, 主要有铁黑云母、含锂铁叶云母、黑鳞云母、锂云母、锂白云母、铁锂云母等, 多为岩浆中晚期结晶。高磷亚类花岗岩的云母类矿物 SiO_2 (37.03%~50.33%)、 Al_2O_3 (20.86%~29.94%)、 Li_2O (1.24%~6.49%) 含量普遍较高, 而低磷亚类的上述氧化物含量偏低, 但 FeO (13.41%~20.23%)、 Fe_2O_3 (2.17%~7.52%)、 MgO (0.21%~5.73%) 含量较高, 暗示着高磷亚类的演化程度较低磷亚类的高。

各岩体的云母随岩体演化从早阶段到晚阶段, 其 SiO_2 、 Li_2O 、F 增加, 而 Al_2O_3 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 减少, 因而其阳离子替代机制主要为 $^{\text{VI}}\text{Li} + ^{\text{IV}}\text{Si} \rightarrow ^{\text{VI}}(\text{Fe}^{2+}) + ^{\text{IV}}\text{Al}$ 。随云母化学成分变化, 其种属也发生相应变化, 如癞子岭岩体云母自底部向顶部, 由黑鳞云母转化为锂云母; 水溪庙岩体云母自第一阶段到第三阶段的演化趋势为: 铁白云母→铁锂白云母→铁锂云母→锂云母; 雅山岩体云母自早到晚有黑鳞云母→铁白云母→铁锂白云母→锂云母的演化方向; 三标复式岩基中三标岩体为铁质黑云母; 帽子顶岩体主要为铁质黑云母、铁叶云母和黑鳞云母; 铜坑嶂岩体为黑鳞云母; 岩背岩体的云母主要为含锂

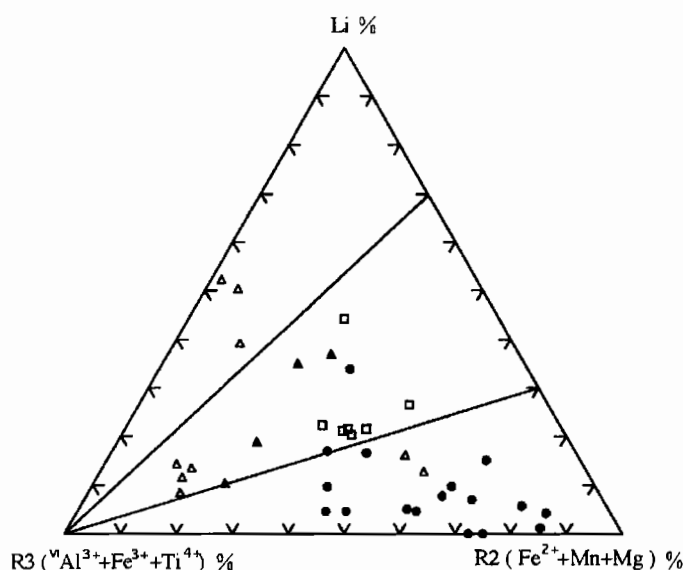


图 1 华南富氟花岗岩中云母 Li-R3-R2 投影图

Fig. 1 Li-R3-R2 plots of micas of F-rich granites in South China

△—雅山; □—水溪庙; ●—赣南; ▲—癞子岭

△—Yashan; □—Shuiximiao; ●—South Jiangxi province; ▲—Laiziling

铁叶云母; 野鸡尾岩体云母主要为黑鳞云母。总体上高磷亚类主要为富锂的云母, 低磷亚类主要为富铁黑云母(表 2, 图 1)。华南富氟花岗岩两亚类型中云母所表现的这种成分变化与目前国外被研究的富氟花岗岩云母类演化趋势^[15]相类似。

3 岩石地球化学

3.1 主元素

华南富氟花岗岩中的高磷亚类和低磷亚类具明显的岩石地球化学上的差别。高磷亚类的

表2 华南富氟花岗岩中云母化学成分(%)

Table 2 The chemical compositions (%) for mica of F-rich granites in South China

类型	低磷					高磷					
产地	三标	帽子顶	岩背	野鸡尾	癞子岭	雅山			水溪庙		
种属	铁质黑云母	铁质黑云母	含锂铁叶云母	黑磷云母	黑磷云母	黑磷云母	锂白云母	锂云母	铁锂云母	锂白云母	锂云母
样品数	3	3	2	2	6	2	5	2	2	2	1
SiO ₂	36.25	38.19	36.14	43.00	42.24	37.03	45.56	50.09	46.16	44.89	50.33
TiO ₂	1.96	1.167	1.53	0.05	1.60	2.02	0.26	0.08	0.15	0.34	0.28
Al ₂ O ₃	17.40	18.95	18.07	22.94	21.40	21.70	29.94	24.04	20.86	27.60	22.44
Fe ₂ O ₃	4.48	4.21	7.52	2.17	2.60	2.33	0.95	0.53	1.27	4.31	3.34
FeO	19.59	19.69	20.23	13.41	14.84	16.80	3.15	0.40	8.72	4.09	2.14
MnO	0.63	0.78	0.46	1.29	0.96	1.62	1.05	0.94	1.44	1.04	0.76
MgO	5.73	2.50	1.11	0.47	0.21	2.80	0.46	0.02	0.79	0.40	0.35
CaO	0.52	0.38	0.12	0.14	0.19	0.17	0.04	0.06	0.13	0.11	0.59
Na ₂ O	0.18	0.25	0.51	0.46	0.36	0.10	0.50	0.43	0.30	0.31	0.37
K ₂ O	8.57	8.41	7.74	8.48	9.69	9.36	10.27	10.16	9.97	10.38	10.28
P ₂ O ₅	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Li ₂ O	0.45	0.73	0.54	1.46	2.11	1.40	1.55	5.45	3.57	1.24	6.49
Rb ₂ O	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.70	1.60	0.00	0.00	0.00
F	1.62	2.08	2.51	3.71	3.15	2.74	3.38	7.83	0.00	0.00	0.00
H ₂ O ⁺	2.85	3.27	3.66	3.18	2.13	1.92	2.46	0.86	4.00	4.00	4.00
O=2F	-0.68	-0.87	-1.05	-1.56	-1.32	-1.15	-1.42	-3.29	0.00	0.00	0.00
总量	99.81	99.74	99.05	99.16	100.16	99.31	98.86	99.17	97.34	98.69	101.37

注:三标、帽子顶数据为本文提供;岩背引自文献[21];野鸡尾引自谢永林.湖南郴县野鸡尾含锡斑岩成岩成矿机制研究.南京大学硕士论文,1994;癞子岭引自文献[2]和刘伟新.湖南香花岭地区稀有金属矿化花岗岩的地质地球化学和成因.南京大学硕士论文,1990;雅山引自曹晓云.江西宜春414 钽铌矿床成矿规律的研究.南京大学硕士论文,1982;水溪庙引自甘晓春.栗木水溪庙锡钽铌矿化花岗岩及矿床成因.南京大学硕士论文,1989.

P₂O₅ > 0.1%,低磷亚类的 P₂O₅ < 0.1%(图 2A,表 3);高磷亚类相对于低磷亚类低 SiO₂(图 2B)、CaO(图 2C);高磷亚类为强过铝质, A/NKC > 1.1%(主要 > 1.2%)(图 2D),雅山晚期(④、⑤阶段)及水溪庙岩体的 Al₂O₃ > 15%(图 2F);低磷亚类的为弱过铝质, A/NKC < 1.3%(图 2D)(主要为 < 1.1%), Al₂O₃ < 15%(图 2E)。因此,图 3 反映出高磷亚类倾向于在 (Al+Na+K) 顶端集中,低磷亚类则相对远离 (Al+Na+K) 顶端。

高磷亚类的 Na/K (atom) > 1,低磷亚类的 Na/K < 1(图 2E),它们的 Na₂O 含量各为 3.06%~6.35%和 2.65%~4.65%,K₂O 含量分别为 2.45%~4.32%和 3.57%~5.49%(表 3)。因此高磷亚类的相对富 Na,低磷亚类的则相对富 K。

3.2 微量元素

将华南富氟花岗岩微量元素按其相对场强排列,与美国地球化学标样酸性流纹岩(RGM-1)[15]相比,华南富氟花岗岩总体表现富含“亲石元素”,F、Rb、Th、U、Nb、Ta 具正异常,一般是 RGM-1 的 10 倍;而斜长石相容元素 Sr、Ba、Eu 及 Cl 则表现亏损,一般是 RGM-1 的 1/10(图 4),可能是富氟花岗岩浆早期结晶分异的富钙斜长石已将这些相容元素带走。

高磷亚类和低磷亚类在微量元素方面也存在一些区别,高磷亚类的(雅山岩体)Zr 含量远低于低磷亚类的;高磷亚类的 Li 含量也明显高于低磷亚类的。低磷亚类 Y 含量显著高于高磷亚类。矿物学研究表明,低磷亚类中副矿物以钼矿和磷钼矿为主;而高磷亚类中,则以晶质铀矿、富铀细晶石或富铀锆石的出现为特征,表明低磷亚类 Th 含量高于高磷亚类,U 则相反。

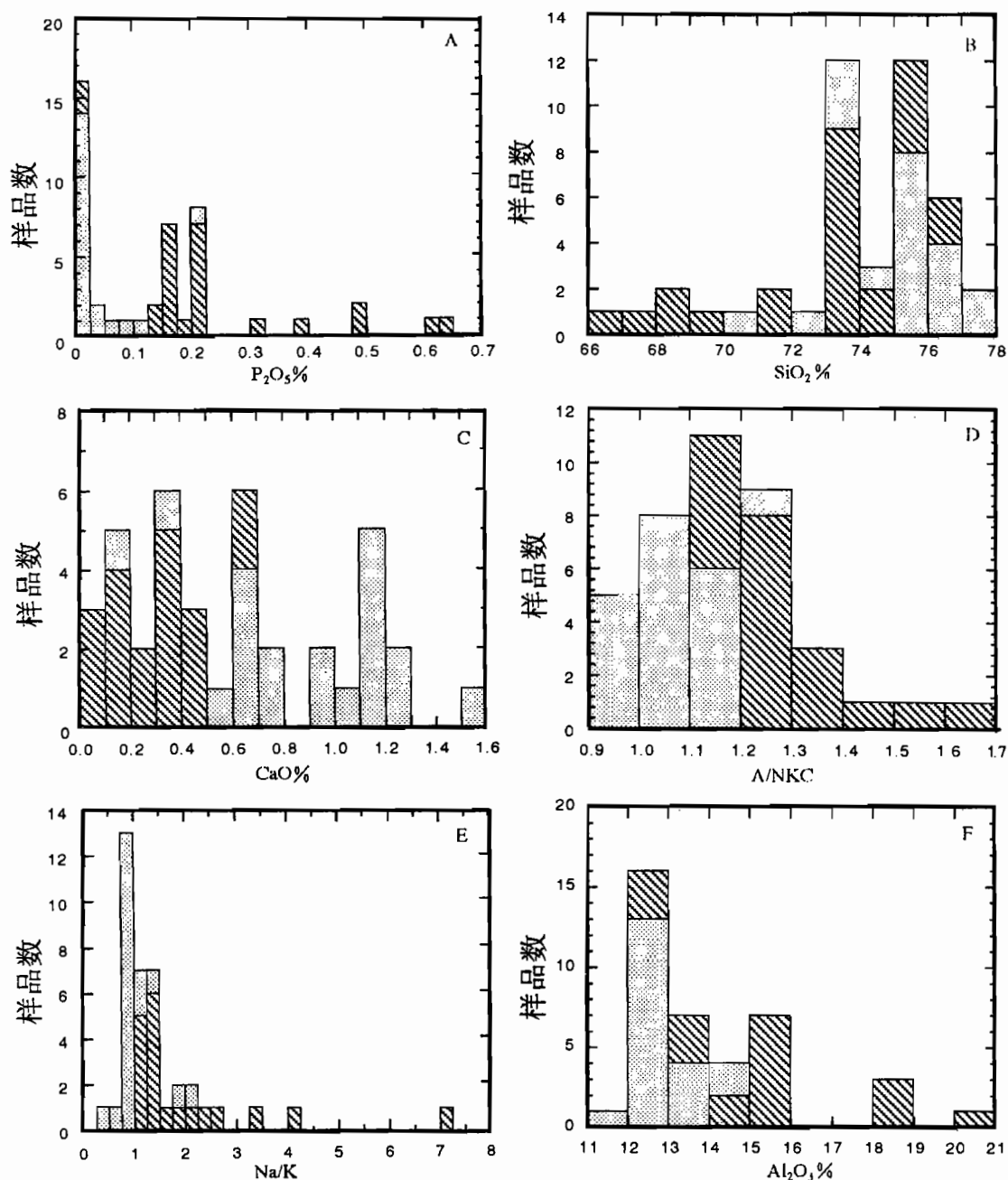


图2 华南富氟花岗岩化学成分直方图

Fig. 2 Histograms of chemical compositions of F-rich granites in South China

斜线为高 P_2O_5 亚类 (bias for high- P_2O_5 subtype); 点为低 P_2O_5 亚类 (points for low- P_2O_5 subtype)

3.3 稀土元素

华南富氟花岗岩作为总体稀土元素配分曲线呈“海鸥”状,轻稀土较重稀土略富集,具强烈 Eu 亏损,弱 Ce 亏损。但低磷亚类稀土总量 ($\Sigma REE=259.41\sim 481.62$) 高于高磷亚类稀土总量 ($\Sigma REE=5.01\sim 40.04$) (表 3, 图 5)。另外,部分高磷亚类花岗岩稀土元素配分曲线在 Nd、Gd、

Er 等处具波动性,表现出弱的四分组效应^[25],说明这些岩石形成过程中曾出现熔体—流体共存现象。

4 讨论

Simpson^[26]据实验研究,提出磷可以块磷铝石级组分形式(AlPO_4)进入长石结构,形成高磷钠长石($\text{NaAl}_{1+x}\text{P}_x\text{Si}_{3-2x}\text{O}_8$)和高磷正长石($\text{KAl}_{1+x}\text{P}_x\text{Si}_{3-2x}\text{O}_8$)。90 年代初,对富氟花岗岩和花岗伟晶岩的研究发现,一类岩体含磷较高,如加拿大 Tanco 伟晶岩含 P_2O_5 1.2%,英国 Cornwell 花岗岩含 P_2O_5 0.27%~0.58%,法国 Beauvoir 花岗岩含 P_2O_5 1.08%~1.63%^[13],雅山岩体含 P_2O_5 0.12%~0.56%,水溪庙岩体含 P_2O_5 0.17%。在这些高磷富氟岩体中,像 Simpson^[26]实验所证实那样,磷主要赋存长石中(斜长石和钾长石),如英国 Cornwell

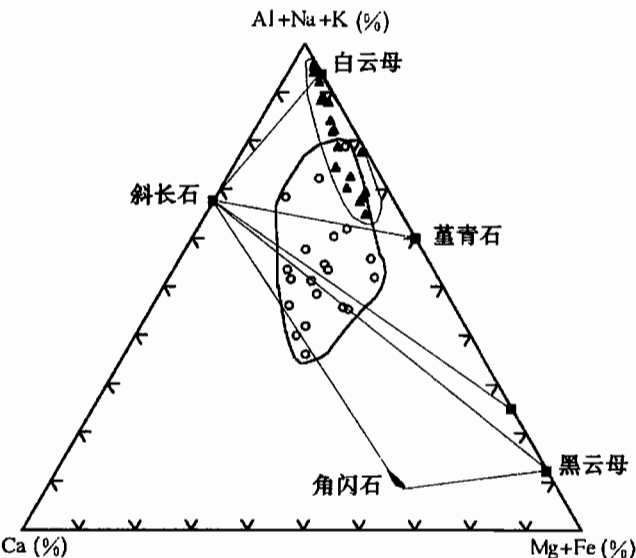


图 3 华南富氟花岗岩 Al+Na+K-Ca-Mg+Fe 三元投影图
Fig. 3 Al+Na+K-Ca-Mg+Fe plots of F-rich granites in South China
▲—高磷亚类;○—低磷亚类
▲—High-P subtype;○—low-P subtype

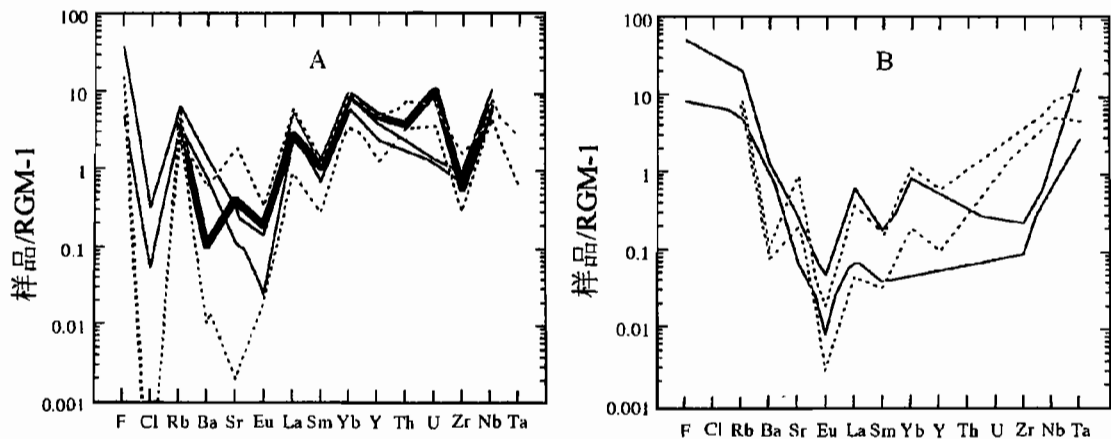


图 4 华南富氟花岗岩 RGM-1 标准化微量元素配分模式
Fig. 4 RGM-1 normalized trace element patterns of F-rich granites in South China

A—低磷亚类,细实线为岩背(11),粗实线为野鸡尾(1),虚线为赣南(5);
B—高磷亚类,细实线为雅山(5),虚线为水溪庙(3);括号内数字为样品数
A—Low-P subtype, thin line for Yanbei (11), thick line for Yejiwei (1), dotted line for south of Jiangxi province (5);
B—high-P subtype, thin line for Yashan (5), dotted line for Shuiximiao (3); numbers in parentheses are sample number

花岗岩钾长石含 P_2O_5 0.6%, 斜长石含 P_2O_5 0.4%; 加拿大 Tanco 伟晶岩钾长石含 P_2O_5 > 1%^[13], 栗木岩体钾长石含 P_2O_5 0.18%, 钠长石含 P_2O_5 0.20%; 雅山岩体钾长石含 P_2O_5 0.20%, 钠长石含 P_2O_5 0.38% 等。这些长石对全岩磷贡献率达 80% 以上^[14], 而磷灰石对全岩磷贡献率小。而低磷亚类长石中磷含量低 (<0.01%), 主要赋存磷灰石中。研究还表明, 长石中 $PAISi_2$ 替换不超过总量 5%, 替换造成长石晶胞体积变化, 现有测试精度还无法辨别^[27]。

长石中 $PAISi_2$ 的替换, 要求全岩必须是强过铝质的 ($A/NKC > 1.1$), 因为长石中块磷铝

表 3 华南富氟花岗岩全岩化学成分(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)

Table 3 The chemical compositions for the whole rock (%) and trace element contents ($\times 10^{-6}$) of F-rich granites in South China

类 型	高 磷						低 磷					
地 点	雅山①	雅山②	雅山③	雅山④	雅山⑤	水溪庙	岩背 1	岩背 2	野鸡尾	帽子顶	铜坑樟	癞子岭
样品数	3	4	2	3	4	3	4	8	1	2	2	2
SiO ₂	75.12	74.54	74.72	74.00	68.12	73.38	75.94	75.92	74.67	75.17	75.31	72.82
TiO ₂	0.10	0.06	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.13	0.06	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	14.04	13.98	13.44	15.39	19.18	15.08	12.36	12.35	12.59	12.72	13.12	14.83
Fe ₂ O ₃	0.40	0.40	0.46	0.11	0.15	0.12	0.63	0.45	1.50	0.20	0.20	0.00
FeO	0.95	1.00	1.17	0.39	0.22	1.02	1.13	1.24	0.39	0.91	0.89	1.69
MnO	0.12	0.27	0.13	0.16	0.12	0.13	0.07	0.06	0.12	0.05	0.06	0.47
MgO	0.22	0.15	0.33	0.03	0.02	0.16	0.00	0.05	0.18	0.10	0.18	0.12
CaO	0.46	0.43	0.28	0.16	0.09	0.36	1.13	0.95	1.03	0.68	0.39	0.67
Na ₂ O	3.48	3.56	3.06	4.80	6.35	4.41	2.65	2.99	3.53	3.91	3.05	4.65
K ₂ O	4.32	4.26	4.32	3.91	2.45	3.93	5.49	5.07	4.51	4.45	4.81	3.57
P ₂ O ₅	0.12	0.14	0.20	0.27	0.56	0.17	0.00	0.00	0.02	0.06	0.04	0.00
F	0.27	0.35	0.49	0.43	1.66		0.59	0.77		0.40	0.39	0.66
Li ₂ O	0.11	0.05	0.08	0.14	1.14		0.93	0.70	1.06	1.21	1.10	
2F=O	-0.11	-0.15	-0.20	-0.18	-0.70		-0.25	-0.32		-0.17	-0.16	-0.28
总量	99.60	99.03	98.53	99.66	99.37	98.80	100.66	100.25	99.73	99.72	99.39	99.19
A/NKC	1.25	1.24	1.32	1.26	1.46	1.24	1.01	1.02	1.00	1.02	1.20	1.17
样 品 数						3	4	8	1	2	2	
Rb	891(10)	872(3)	754(3)	1786(11)	3269(12)	1166.33	685.50	822.50	565	632.00	833.50	
Sr	26.5(8)	16(3)	18.1(3)	11(11)	6.9(12)	42.43	21.38	19.76	40.2	9.50	4.40	
Zr	46.4(7)	30.7(3)	37.1(3)	23.3(4)	18.7(7)		158.43	158.49	117	82.00	68.00	
Nb	43(6)	47(2)	40(2)	62(17)	68.9(8)	66.50	82.88	74.74	62.6	71.85	56.80	
Hf							7.63	9.01	7.9	<3.9	<3.9	
Sn						418.67	11.08	50.29		7.00	15.50	
W	22.9(4)	41.8(1)	5.4(1)	9.3(5)	12.8(4)	87.10	15.20	17.65	16	5.70	7.25	
Sc							1.20	1.99	n.d.	n.d.	n.d.	
Cr							22.75	18.50	n.d.	2.10	1.00	
Ni							10.73	13.58	12	0.45	0.60	
Pb							36.40	34.21	63	0.00		
Zn							87.20	85.03	55	0.00		
Cl							32.38	50.60	n.d.	0.02	0.01	
Th									42	65.25	45.05	
U									25.7	13.70	14.50	
Ta	23.5(4)	16.4(1)	22(1)	65(17)	137(8)	48.23				8.15	11.25	
Ba						70.93			81	22.00	25.00	
Li	563(7)	294(3)	246(3)	723(9)	5243(10)	368.00				151.35	223.50	

样品数	3	1	1	4	3	3	4	7	1	2	2	
La	7.05	4.57	10.23	1.13	1.37	3.31	56.40	64.21	46.24	32.26	24.79	
Ce	15.78	8.71	21.86	2.54	1.61	6.33	94.88	90.64	79.75	77.46	59.70	
Pr	2.56	2.26	3.81	n.d.	n.d.	1.10	13.63	14.56	14.9	11.04	8.44	
Nd	7.42	4.12	9.95	1.59	0.96	2.89	48.30	50.11	51.15	2.83	31.34	
Sm	1.86	1.38	2.21	0.92	0.47	1.17	12.33	12.03	12.8	13.16	8.77	
Eu	0.14	0.03	0.16	0.12	0.05	0.04	0.14	0.18	0.68	0.16	0.11	
Gd	1.64	0.97	1.53	0.80	0.52	1.12	10.85	10.36	15.7	14.43	8.41	
Tb	0.29	0.36	0.39	n.d.	n.d.	0.37	2.03	1.91	3	2.79	1.74	
Dy	1.38	1.74	1.57	n.d.	n.d.	1.61	14.38	13.86	21.18	16.73	11.57	
Ho	0.24	0.35	0.30	n.d.	n.d.	0.27	3.33	3.37	4.9	3.88	2.62	
Er	0.66	0.79	0.65	n.d.	n.d.	0.77	10.58	10.71	14.82	12.47	9.26	
Tm	0.15	0.20	0.16	n.d.	n.d.	0.16	1.90	1.84	2.4	2.10	1.70	
Yb	0.76	1.49	0.88	n.d.	n.d.	1.08	13.83	13.80	16.49	14.32	12.93	
Lu	0.14	0.18	0.11	0.03	0.03	0.15	2.10	2.13	2.46	2.24	1.99	
Y	2.96	0.00	0.00	1.41	1.47	8.64	97.90	100.79	140.26	119.81	76.08	

注:雅山①②③④⑤分别为黑磷云母-白云母花岗岩、斑状白云母花岗岩、中粒白云母花岗岩、锂云母花岗岩、黄玉锂云母花岗岩;水溪庙为花岗岩;岩背1为花岗斑岩,岩背2为花岗岩;野鸡尾为花岗斑岩;帽子顶为黑云母花岗岩;铜坑岭为花岗斑岩;癞子岭为钠长花岗岩。资料来源:野鸡尾引自谢永林.湖南郴县野鸡尾含锡斑岩成岩成矿机制研究.南京大学硕士论文,1994;癞子岭引自周凤英.华南某些富氟花岗岩岩浆-热液过渡阶段的地球化学研究.南京大学博士论文,1994;雅山引自文献[16];水溪庙引自甘晓春.栗木水溪庙锡钨钽矿化花岗岩及矿床成因.南京大学硕士论文,1989;其它为本文。括号内数字为样品数。

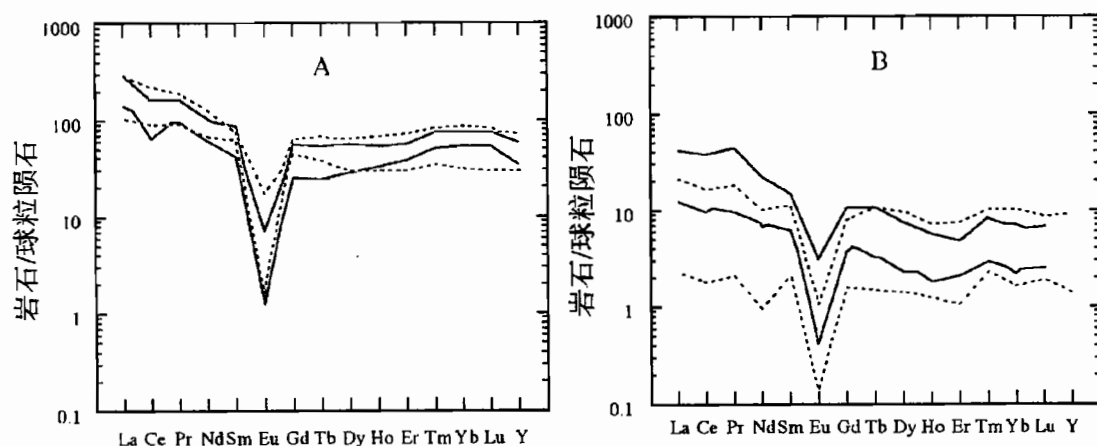


图5 华南富氟花岗岩稀土元素配分曲线

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of F-rich granites in South China

A—低磷亚类,细实线为岩背(11),虚线为赣南(5);B—高磷亚类,细实线为雅山(5),

虚线为水溪庙(3);括号内数字为样品数

A—Low-P subtype, thin line for Yanbei (11), dotted line for south of Jiangxi province (5); B—high-P subtype,

thin line for Yashan (5), dotted line for Shuiximiao (3); numbers in parentheses are sample number

石组分中Al是过量铝。因此高磷亚类岩石必须是强过铝质,并且全岩 P_2O_5 含量与过铝指标A/NKC值呈正相关,如雅山岩体从第①至第⑤ P_2O_5 (%)从0.12→0.14→0.20→0.27→0.56,而A/NKC值从1.24→1.24→1.32→1.26→1.46(表3)。到目前为止,还未发现富磷而铝不饱和或准铝花岗岩存在。由于高磷富氟岩浆总是低Ca、REE,因此,在岩浆早阶段,稀土磷酸盐矿物(磷钇矿、独居石等)和磷灰石达不到饱和,不能结晶以缓冲岩浆中磷,使磷在岩浆演化晚阶段越来越富集,形成富磷富氟残余熔体,最终磷以富磷长石和少量磷锂铝石晶出。如雅山岩

体^[16]和水溪庙岩体伟晶岩相中均有磷锂铝石。这样,一些学者认为高磷亚类是从低磷亚类演化而来,可能不能以一个人作为指标把它们划分开^[13, 14];但另一些研究者认为高磷亚类和低磷亚类与源区有关,源区被熔融的长石如果是富磷的形成高磷岩浆,反之形成低磷岩浆^[15, 27]。从雅山岩体第①阶段至第⑤阶段, P_2O_5 逐渐增高来看,笔者趋向于前一种观点。

据 London^[14]实验研究表明,在 200 MPa 水压时,过铝花岗岩体系中 P_2O_5 的加入会扩大石英的首晶区,并且显著地降低固相线温度(3.5% P_2O_5 可降低 55℃),加磷熔体随着演化,逐渐形成更富磷、富钠、富铝、贫硅的残余熔体。磷与氟作用相似,可使熔体解聚,降低熔体粘度,增加熔体活动能力,并与成矿元素 Sn、W、Nb、Ta 等形成络合作用,在搬运和活化这些成矿元素方面,磷和氟一样扮演着重要角色。因此,对华南这两类富氟岩体的深入研究,对于提高稀有金属矿床的普查找矿的认识有重要意义。

5 结 论

通过以上对华南各富氟花岗岩体矿物学、岩石地球化学特征的讨论可以得出几点结论:①华南富氟花岗岩也可分为高磷与低磷两亚类,高磷亚类花岗岩的全岩 P_2O_5 含量一般 $>0.1\%$,低磷亚类花岗岩 P_2O_5 含量一般 $<0.1\%$ 。②高磷和低磷两亚类花岗岩具有较大的地球化学差异,高磷亚类花岗岩主要表现为具较高的 A/NKC、Na/K、 Al_2O_3 ,低磷亚类花岗岩则表现为具较高的 SiO_2 、CaO、Mg+Fe。高磷亚类花岗岩的稀土总量很低,而低磷亚类花岗岩的稀土总量很高。与两亚类花岗岩体有关的矿化作用也不尽相同,前者主要发生 Nb、Ta 矿化,后者主要发生 Sn、W、Be 矿化。③高磷亚类花岗岩的磷主要以长石中结构磷和磷铝锂石形式存在,而低磷亚类花岗岩的磷则主要存在于磷酸盐副矿物中。

参 考 文 献

- Christiansen E M, Bikun J V, Sheridan M F, Burt D M. Geochemical evolution of topaz rhyolite from the Thomas Range and Spor Mountain, Utah, Amer. Mineral., 1984, 69: 223~236.
- 黄蕴慧, 杜绍华. 香花岭岩石矿床与矿物. 北京科学技术出版社, 1988.
- 陈德潜. 论香花岭花岗岩的成因与稀土地球化学特征. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 1987, (2): 61~74.
- 常海亮. 香花岭黄玉斑岩中熔融包裹体的研究. 宜昌地质矿产研究所刊, 1985, (9): 33~41.
- 王联魁. 南岭花岗岩类液态分离实验研究, 中国科学(B辑), 1987, 17(1): 79~87.
- 袁忠信. 稀有金属花岗岩型矿床成因. 矿床地质, 1987, 6(1): 88~96.
- 孙世华, 于洁. 钽花岗岩的结构. 科学通报, 1990, (9): 682~689.
- 朱金初. 论翁岗岩和黄英岩的空间和成因关系, 岩石学报, 1993, 9(2): 158~166.
- 朱金初, 李人科, 周凤英, 王汝成, 熊小林, 许红忠. 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, 1996, 25(1): 1~9.
- Manning D A C. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kbar. Contrib Mineral Petrol., 1981, 76: 206~215.
- Eadington P J, Nashar B. Evidence for the magmatic origin of quartz-topaz rocks from the New England Batholith, Australia. Contrib. Mineral. Petrol., 1987, 67: 433~438.
- Kortemeier W T, Burt D M. Ongonite and topazite dikes in the Flying W Ranch area, Tonto basin, Arizona. Amer. Mineral., 1988, 73: 507~523.
- London D. Phosphorus in S-type magmas: The P_2O_5 content of feldspars from peraluminous granites, pegmatites, and rhyolites. American Mineralogist, 1992, 77: 126~145.
- London D, Morgan V I G B, Babb H A, Loomis J L. Behavior and effects of phosphorus in the system $Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2-P_2O_5-H_2O$ at 200 MPa (H_2O). Contrib Mineral Petrol, 1993, 113: 450~465.
- Taylor R P. Petrological and geochemical characteristics of the Pleasant Ridge zinnwaldite-topaz garnite, southern New

- Brunswick, and comparisons with other topaz-bearing felsic rocks. *Canadian Mineralogist*, 1992, 30: 895~921.
- 16 Yin Lin, Pollard P J, Hu Shouxi, Taylor R G. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, 1995, 90: 577~585.
- 17 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 熊小林. 江西岩背火山侵入杂岩的地球化学特征和成因. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(5): 531~538.
- 18 刘昌实, 贺伯初. 赣东南含黄玉岩浆岩成因议. *南京大学学报(地球科学)*, 1991, 3: 220~230.
- 19 贺伯初, 刘昌实. 赣南三标地洼型复式花岗岩基成因及其环境演化特征. *大地构造与成矿学*, 1992, 16(3): 265~274.
- 20 沈渭洲, 王德滋, 谢永林, 刘昌实. 湖南千里山复式花岗岩体的地球化学特征和物质来源. *岩石矿物学杂志*, 1995, 14(3): 193~202.
- 21 刘昌实, 沈渭洲, 熊小林, 王德滋. 江西岩背含锡斑岩主要造岩矿物标型特征. *矿物学报*, 1994, 14(1): 7~13.
- 22 Pollard P J, Taylor R P. Petrogenetic and metallogenetic implications of the occurrence of topaz-Li-micagranite at the Yichun Ta-Nb-Li mine, Jiangxi Province, South China. In Pagel M, Leroy J L, eds. *Source, transport and deposition of metals*. Amsterdam, Balkema, 1991. 789~791.
- 23 Rosenberg P E. Compositional variations in synthetic topaz. *Amer. Min.*, 1972, 57: 169~187.
- 24 Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas; U. S. Geol. Survey. Prof. Paper, 1960. 354.
- 25 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼 M B. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应. *地球化学*, 1992, 3: 221~233.
- 26 Simpson D R. Aluminum phosphate variants of feldspars. *Am. Mineral.*, 1977, 62: 351~355.
- 27 Kontak D J, Martin R F, Richard L. Patterns of phosphorus enrichment in alkali feldspar, South Mountain Batholith, Nova Scotia, Canada. *Eur. J. Mineral.*, 1996, 8: 805~824.

Contrast Between the High-P Subtype and Low-P Subtype of F-Rich Granites in South China

Huang Xiaolong, Wang Rucheng, Chen Xiaoming, Chen Peirong and Liu Changshi

(State Key Laboratory of Mineral Deposit, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Abstract

F-rich granites in South China may be divided into the high-P subtype and low-P subtype according to their whole-rock P_2O_5 contents. There are obvious differences in chemical compositions of these two subtypes. The high-P subtype is strongly peraluminous and characterized by low-silica, very low REE contents and higher A/NKC and Na/K values, while the low-P subtype is weakly peraluminous and characterized by high-silica, very high REE contents and high CaO and Mg+Fe values. There are also some differences in their mineralization. High-P subtype granites are mainly related to Nb and Ta mineralization, while low-P subtype granites are mainly related to Sn, W and Be mineralization. The micas of high-P subtype granites are richer in Li, while those of low-P subtype granites are richer in Fe. The phosphorus of high-P subtype mainly appears in the feldspar structure as $PAISi_{-2}$ or subordinately in the amblygonite as an accessory mineral, and the P_2O_5 contents in the feldspars are high. On the contrary, the P_2O_5 contents in the feldspars of low-P subtype granites are very low ($<0.01\%$, within the detection limit of microprobe analysis), and phosphorus is mainly hosted in trace amounts of phosphate minerals.

Key words: F-rich granites; high-P subtype; low-P subtype; South China

作者简介

黄小龙,男,1972年1月生。1997年于南京大学地球科学系获硕士学位。现为南京大学地球科学系岩石学专业在读博士生。通讯作者:刘昌实;通讯地址:210093,南京大学地球科学系。