

Li-F 花岗岩液态分离的稀土地球化学标志

王联魁¹ 王慧芬¹ 黄智龙²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002.

1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;*

2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002.*

1998-08-24收稿, 1999-02-28改回.

Wang Liankui, Wang Huifen and Huang Zhilong. 1999. The geochemical indicatrixes of the REE in Li-F granite liquid segregation. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2):170~180

Abstract The results of 118 REE analyses of Li-F granites from South China and other countries indicate that there are three variation types of REE model curves with the different evolution from early to late stages of Li-F granite complex or from lower to upper petrofacies of the Li-F granite body, which are (1) decreasing, (2) increasing and (3) saltatory variation types. The first variation type is called positive evolution type, which is the production of crystallization differentiation. The second variation type is called reversion evolution type, which represents the liquid segregation mainly with vapour-liquid fractional distillation. The third variation type is called saltatory variation type, which is formed from the liquid segregation mainly with immiscibility. Therefore, the indicatrixes of the liquid segregation mainly with immiscibility are the saltatory variation type of REE model evolution and the separate feature of main-evolution trend line either with sub-evolution trend line or with composition point of Li-F granites in the diagrams of REE-(La/Yb)_n and La/Sm-La. The indicatrixes of the liquid segregation with vapour-liquid fractional distillation are the reversion evolution type of REE model curves and the main evolution trend line of Li-F granites is directional to the right upper part of the diagrams of REE-(La/Yb)_n and La/Sm-La.

Key words REE geochemistry, Rare element granite, Magmatic immiscibility, Liquid segregation

摘要 华南和其他国家典型 Li-F 花岗岩的 118 个稀土分析研究表明, 随 Li-F 花岗岩由早至晚阶段或自下而上不同岩相演化, 稀土模式曲线有三种变化类型: ①降低变化, ②升高变化, ③突然变化等类型。①称为正向演化类型, 是结晶分异结果; ②称为反向演化类型, 代表气液分馏为主的液态分离; ③称为演化突变类型, 是不混溶为主的液态分离形成。因此, 不混溶为主的液态分离标志是稀土模式演化突变类型和 Li-F 花岗岩在 REE-(La/Yb)_n、La/Sm-La (μg/g) 图解中主演化方向线与次演化方向线或与成分点呈分离特点。气液分馏为主的液态分离标志是稀土模式反向演化类型和 Li-F 花岗岩在 REE-(La/Yb)_n、La/Sm-La (μg/g) 图解中主演化方向线, 指向图解的右上方等。

关键词 稀土地球化学; 稀有元素花岗岩; 岩浆不混溶; 液态分离

中图法分类号 P588.121; P597

世界广泛分布的富含 Li、F 的花岗岩, 常伴有稀土和钨钼铋钽等多种矿化, 因而通常称为稀有元素花岗岩, 本文称为 Li-F 花岗岩。根据华南和世界各地 Li-F 花岗岩的地质特征, 这类花岗岩往往构成多阶段侵入的复式岩体(岩套), 自早至晚分为如下: 1. 斑状黑云母(角闪石)花岗岩; 2. 中粒黑云母或黑鳞云母花岗岩; 3. 二云母花岗岩; 4. 细粒白云

母或锂云母钠长花岗岩, 表现在岩石、矿物和地球化学上均具演化关系, 无疑是同源多阶段侵入的结果(王联魁等, 1975, 1982)。Li-F 花岗岩另一特点是, 其晚阶段侵入的小岩体, 高度富挥发份, 常具垂直分带, 自下而上出现如下岩相变化: 1. 锂黑云母花岗岩→2. 黑鳞云母(铁锂云母)花岗岩→3. 白云母或锂云母钠长花岗岩→4. 云英岩→5. 似伟晶岩。

* 第一作者简介: 王联魁, 男, 1929年出生, 研究员, 岩石学(花岗岩成岩成矿)专业。

岩石、矿物和地球化学研究表明,自下而上不同岩相的演化关系,是统一岩浆体系演化结果,岩浆演化包括可能的结晶分异(分离结晶)和液态分离等(王联魁等,1983;1997)。

液态分离是作者过去用来解释 Li-F 花岗岩的许多特殊构造(球粒、球状、条带、流动“涡流”、层状、矿化囊包体和蚀离体等)以及上述不同阶段、不同岩相形成机理所提出的概念(中国科学院地球化学研究所,1979;王联魁等,1983;1987a;1987b;1997)。液态分离可理解为岩浆(液)不混溶(熔体-熔体分离)和气液分馏(熔体-气液分离)两种。岩浆不混溶是 Li-F 花岗岩浆在浅部地壳降温降压过程中产生的液相不混溶,形成组分共轭或互补的熔体-熔体分离作用。气液分馏是高度富 Li、F 的花岗岩浆,侵入到近地表浅处,在降温降压过程中产生自下而上的热重力扩散、“气泡”上升、气体蒸馏等多种形式的气体-熔体(液)分离作用,从而导致岩浆自下而上熔体组分的演化趋势。这两种岩浆作用均属岩浆在液态下的分离作用,因而统称为液态分离,与文献中常用的分离结晶(结晶分异或液相与固相分离)相对照。

根据世界许多 Li-F 花岗岩的 118 个稀土数据,包括干国梁(1988)、王德滋等(1994)、地矿部南岭项目花岗岩专题组(1989)、刘昌实(1993)、梅勇文等(1994)、夏宏远等(1991)、Taylor(1992)、Raimbault(1995)等的大量稀土数据,进行了统计和计算,获得了 Li-F 花岗岩不同阶段(或不同相)稀土的变化规律,反映在花岗岩液态分离的不混溶和气液分馏以及分离结晶等上,均有明显特征,可做为鉴别液态分离的不混溶和气液分馏作用以及分离结晶作用标志。

1 Li-F 花岗岩不同阶段(或不同岩相)稀土模式演化类型反映的液态分离作用

Li-F 花岗岩复式岩体自早至晚侵入阶段或单个 Li-F 花岗岩体自下而上不同岩相成分演化,通常被认为是分离结晶(结晶分异)结果(干国梁,1988;夏卫华等,1989)。从稀土模式曲线变化看,多数情况下, Li-F 花岗岩自早至晚阶段的稀土曲线模式具规律性变化,各稀土模式曲线相似,在图中向下(以曲线①、②……顺序)逐渐变化,反映出随 Li-F 花岗岩演化,REE 与 δEu 均有降低趋势。这种变化趋势,干国梁(1988)对黄沙岩体、宋新华等(1992)对邓阜岩体和朱金初等(1989)对华南钨锡花岗岩的研究中都解释为是结晶分异结果。分离相矿物通过造岩矿物钾长石和副矿物独居石、磷钇矿等的分离,使晚阶段 Li-F 花岗岩产生 REE 和 δEu 降低的变化。我们将这种自早至晚阶段 Li-F 花岗岩稀土模式逐渐向下的变化,称为 Li-F 花岗岩稀土模式正向演化类型,作为判别分离结晶(结晶分异)作用的标志。

1.1 Li-F 花岗岩稀土模式反向演化类型(即气液分馏为主的液态分离类型)

Li-F 花岗岩不同阶段稀土模式变化方向,还有与上述正向演化类型相反的一类,我们称为 Li-F 花岗岩稀土模式反向演化类型(图2),其代表性典型岩体分述如下:

1. 浙江泰顺岩体(图2a),据王德滋等(1994)的资料,深部钻孔揭露岩石标本 51(号,下同)为二长花岗斑岩,在标高 600 m 处标本 52 为黄玉二长花岗斑岩,浅部标本 53 为黄玉钾长花岗斑岩,在 780 m 标高处为标本 54 黄英斑岩,表明自下而上岩相变化相当于三端元组^①分变化,即二长花岗斑岩(O)→黄玉二长花岗斑岩(X)→黄玉钾长花岗斑岩(X)→黄英斑岩(T),反映在稀土模式上,51→52→53→54号模式曲线和 REE 均有升高变化趋势。

2. 江西铜坑岩体(图2b),据梅勇文等(1994)、刘昌实等(1993)研究,该岩体发育细粒黑云母花岗岩、花岗斑岩和黄玉石英斑岩等不同岩石类型,细粒黑云母花岗岩为早阶段或为斑岩的深部岩相,花岗斑岩和黄玉石英斑岩均属浅成相,因此岩体自下而上垂直岩相变化应为标本(下同)49 细粒黑云母花岗岩→50 花岗斑岩→48 黄玉石英斑岩,相当于三端元组分变化是:49 翁岗岩(O)→50 香花岭岩(X)→48 黄英岩(T)的变化趋势,其稀土模式曲线和 REE 也有随 Li-F 花岗岩相变浅而升高的变化趋势。

3. 江西牛岭岩体(图2c),由图可看出,岩体自下而上分相是:①细粒白云母碱长花岗岩(钠长花岗岩上部)→②云英岩→③似伟晶岩。①为岩浆花岗岩,周凤英(1994)认为②和③应属岩浆热液过渡阶段岩石。因而在垂直剖面相当于三端元组分的变化(自下而上)是:①细粒白云母碱长花岗岩(O)→②云英岩(X)→③似伟晶岩(XT),其稀土模式曲线和 REE 随岩相变浅而有升高的变化趋势,曲线的中稀土和轻稀土部分升高的更明显。

4. 江西松树岗岩体(图2d),由图可见,岩体自下而上分相是:①白色冰晶石钠碱长花岗岩(相当 O)→②米黄色碱长花岗岩(相当 O)→③肉红色碱长花岗岩(相当 O)→④肉红色细粒微斜长石岩(相当 X)→⑤云英岩(相当 X)→⑥似伟晶岩(相当 XT),在岩体垂直剖面上由岩浆至岩浆热液过渡阶段的岩石分相是明显的,自下而上相当于三端元组分的变化是:①(O)→②(O)→③(O)→④(X)→⑤(X)→⑥(XT),其稀土模式曲线和 REE 均有升高趋势,尤其曲线的中稀土部分升高更显著。

① 据王联魁等(1997) Li-F 花岗岩的三端元组分是:(1)富 Na 的翁岗岩($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$),代号为 O; 2. 富 K 的香花岭岩($\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$),代号为 X; 3. 富 Si 的黄英岩(Q 值特高),代号为 T。

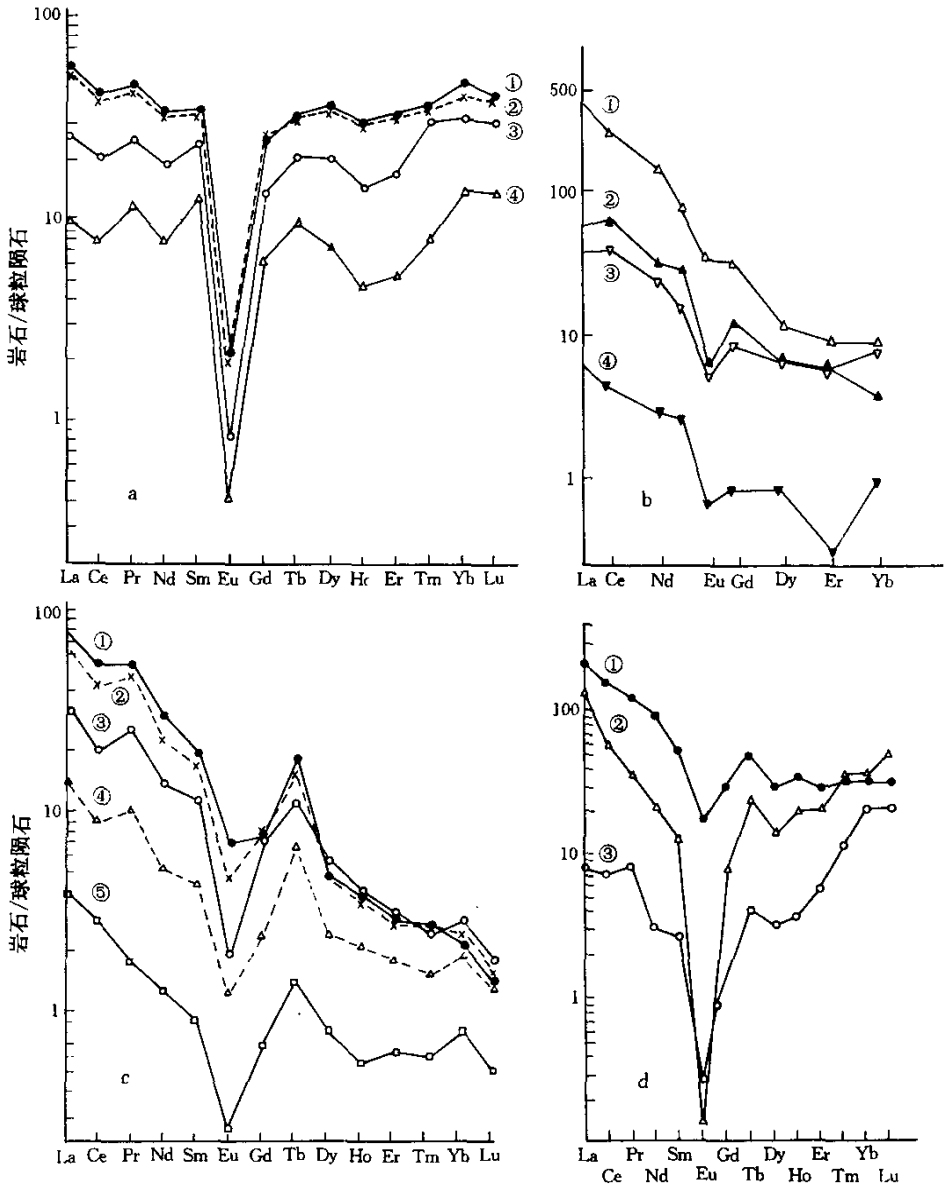


图1 Li-F 花岗岩不同阶段自早到晚 (序号小→大) 稀土模式正向演化类型

a. 黄沙岩体 (据夏卫华等 (1989) 的原图): 第一阶段中①为中粗粒黑云母花岗岩和②为不含电气石的中粗粒斑状黑云母花岗岩, ③为第二阶段中细粒白云母花岗岩, ④为第三阶段细粒白云母花岗岩; b. 望湘岩体 (据夏卫华等 (1989) 的图): ①为第一阶段中粒少斑二云母二长花岗岩, ②为第二阶段细粒二云母二长花岗岩, ③为第三阶段中粒二云母(白云母)二长(碱长)花岗岩, ④为第四阶段微细粒斑状白云母碱长花岗岩, ⑤为第五阶段细粒白云母碱长花岗岩; c. 邓阜仙岩体 (据宋新华等 (1992)): ①为第一阶段斑状中粒黑云母花岗岩, ②为第二阶段中粒二云母花岗岩, ③为第三阶段花岗岩斑岩, ④为第四阶段细粒白云母花岗岩; d. 灵山岩体 (据夏卫华等 (1989) 的图略修改): ①为第一阶段斑状角闪石黑云母花岗岩, ②为第二阶段铁锂云母碱长花岗岩, ③为第三阶段铁锂云母钠长花岗岩

Fig. 1 The positive evolution type in variation of REE model curves from early to late stages (ordinal number from small to large) in Li-F granite composite massif

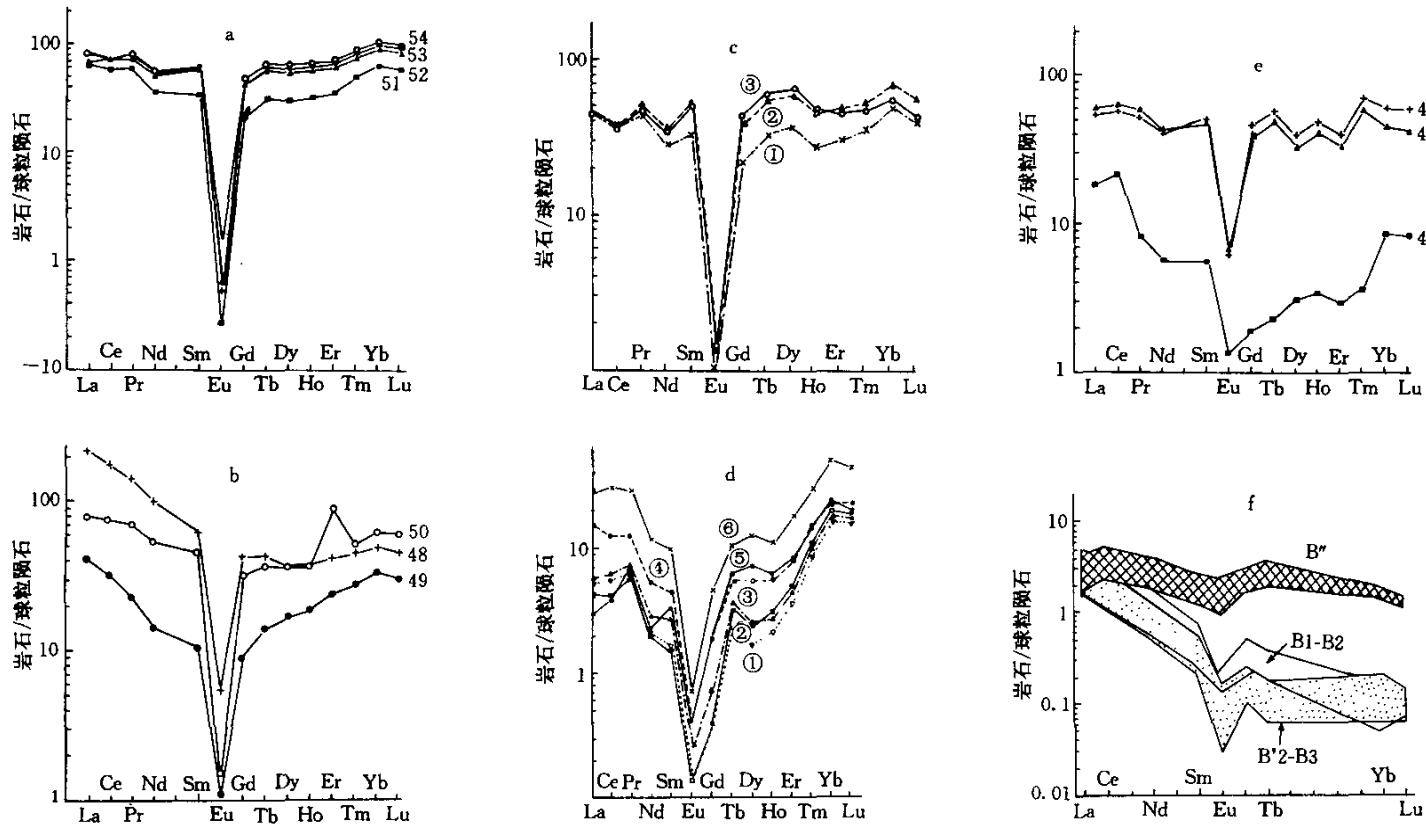


图2 不同岩相或阶段(自下而上或由早到晚按序号排列)Li-F花岗岩稀土模式反向演化类型

a. 秦顺岩体: 51为深部或早阶段二长花岗岩斑岩(O?), 52为中部黄玉花岗岩斑岩(X), 53为浅部黄玉钾长花岗岩斑岩(XT), 54为浅部黄英斑岩(T); b. 铜坑峰岩体: 49为深部或早阶段细粒黑云母花岗岩(O), 50为中部花岗岩斑岩(X), 48为浅部黄玉石英斑岩(T); c. 牛岭坳岩体(据夏卫华等(1989)的原图略修改): ①为细粒白云母碱长花岗岩上部(O), ②为云英岩(X), ③为似伟晶岩(XT); d. 松树岗岩体(据夏卫华等(1989)的原图): ①为白色冰晶石钠碱长花岗岩(O), ②为米黄色碱长花岗岩(O), ③为肉红色黄玉碱长花岗岩(O), ④为肉红色细粒微斜长石岩(X), ⑤为云英岩(X), ⑥为似伟晶岩(XT); e. 松岭岩体: 43为深部或早阶段细粒黑云母花岗岩(O), 44为中部石英斑岩(X), 45为浅部黄玉石英斑岩(T); f. 法国 Beauvoir 岩体(据 Raimbault *et al*(1995)的原图): 自下而上岩相变化是: B3为深部二长花岗岩相(γ), B'2为中下部铁锂云母钠长花岗岩相(O), B2为中部钠长花岗岩相(O), B1为浅部锂云母钠长花岗岩(O), B为岩体顶部外接触带含磷灰石细晶岩(X)。 γ 为花岗岩; O=翁岗岩; X=香花岭岩; T=黄英岩

Fig. 2 The reversion evolution type of REE model curves with different evolution from lower to upper facies of Li-F granite body or from early to late stages of Li-F granite composite massif

表1 反向稀土模式演化类型 Li-F 花岗岩剖面的碱和挥发份变化趋势

Table 1 An alkaline and volatile variation tendency of the Li-F granite for reversion evolution type of REE model curves in vertical section

深度	深部 (下部) → 浅部 (顶部)	
阶段	岩 浆	岩浆-热液过渡
泰顺剖面	岩石	51二长斑岩(O)→52黄英二长斑岩(X)→53黄玉钾长斑岩(XT)→54黄英斑岩(TX)
	Na	→
	K	→
	F	→
	H ₂ O	→
松岭剖面	岩石	43细粒黑云母花岗岩(γ-O)→44石英斑岩(X)→45黄玉斑岩(T)
	Na	→
	K	→
	F	→
	H ₂ O	→
铜坑嶂剖面	岩石	49细粒黑云母花岗岩(O)?→50花岗岩斑岩(X)→48石英斑岩(T)
	Na	→
	K	→
	F	→
	H ₂ O	→
牛岭坳剖面	岩石	①细粒白云母花岗岩(O)→②云英岩(X)→似伟晶岩(XT)
	Na	→
	K	→
	F	→
	H ₂ O	→
松树岗剖面	岩石	①白色冰晶石钠长碱长花岗岩(O)→②米黄色碱长花岗岩(O)→③肉红色黄玉碱长花岗岩(O)→④肉色细粒微斜长石岩(X)→⑤云英岩(X)→⑥似伟晶岩(XT)
	Na	→
	K	→
	F	→
	H ₂ O	→
法国 Beauvoir 剖面	岩石	B3二长花岗岩(γ)→B2铁锂云母钠长花岗岩(O)→B2钠长花岗岩(O)→B1锂云母钠长花岗岩(O)→B'含磷灰石细晶岩(X)
	Na	→
	K	→
	F	→
	Li	→
	H ₂ O	→

→指最高点; (γ) = 花岗岩; (O) = 翁岗岩; (X) = 香花岭岩; (T) = 黄英岩

5. 江西松岭岩体 (图2e), 据梅勇文等 (1994) 和刘昌实等 (1993) 资料, 深部或早阶段为43细粒黑云母花岗岩, 中部为44石英斑岩, 浅部为45黄玉石英斑岩, 因此, 岩体剖面自下而上的变化是43深部细粒黑云母花岗岩(O)→44中部石英斑岩(X)→45浅部黄玉石英斑岩(T), 其稀土模式曲线与REE也有升高变化趋势。

6. 法国 Beauvoir 岩体 (图2f), 由图 (Raimbault, et al, 1995) 可见, 岩体自下而上为B3、B'2(二长花岗岩、铁锂云母钠长花岗岩)→B2、B1(钠长花岗岩、锂云母钠长花岗岩)

→B'相(含磷灰石细晶岩), 自下而上相当于三端元组份的变化是:(γ, O)→(O, O)→(X)变化, 其稀土模式曲线和REE均有升高变化趋势, 尤其重稀土部分更明显。

以上6个典型 Li-F 花岗岩体的岩相, 自下而上岩石组分有γ(花岗岩)→O(翁岗岩)→X(香花岭岩)→T(黄英岩)变化趋势, 随岩相变浅, 其稀土模式曲线(小号→大号)的REE与δEu均有升高变化趋势, 与分离结晶的稀土模式正向演化相反, 应属稀土模式反向演化类型。这种 Li-F 花岗岩稀土模式反向演化, 代表了统一岩浆体系垂直剖面自下而上三端元

组份 $\gamma \rightarrow O \rightarrow X \rightarrow T$ 变化趋势(表1),可见自下而上岩浆的挥发份和钾(H_2O 、P、Li、F、K等)有越向上越高的变化,表明最活泼组份 H_2O 、P、Li、F、K等不断向上,即向顶部或浅部集中富集,形成气液分馏为主的液态分离格局。气液分馏主要是通过热重力扩散(Hildreth, 1979)、“气泡”上升(Eugster, 1985)和F、Cl、P络合物气相向上迁移等多种形式分异构成,从而导致稀土和挥发份同步增长的变化趋势,形成稀土模式反向演化。值得一提的是,岩浆体系的压力突然降低(到地壳浅部)和挥发份F、P、 H_2O 大量参与下,会大大促进“气泡”上升和热重力扩散速度,从而使气液分馏在Li-F花岗岩浆分异中成为重要作用之一。因此,这种Li-F花岗岩稀土模式反向演化类型,可作为鉴别气液分馏为主的液态分离标志。

1.2 Li-F 花岗岩稀土模式演化突变类型(即不混溶为主的液态分离类型)

Li-F 花岗岩由早至晚(序号小→大)阶段稀土模式变化是很规律的(图3),往往有过去很少人注意到的“突变”特点,其典型代表岩体有邓阜仙、栗木、宜春、大吉山、博罗和法国 Beauvoir 等。

(1) 邓阜仙岩体(图3a), Li-F 花岗岩第一到二阶段与最晚的第四阶段间稀土模式曲线,有突然变化,即由形态相似、连续变化和具负异常的平滑曲线(11、12、13号,下同),突然变为与前者不连续的“锯齿状”曲线(14、15、16),表现在 ΣREE ^①上,由99.3~425.8 $\mu g/g$ 突然降到2.8~3.7 $\mu g/g$ 、LREE/HREE 由10.3~25.8突然降到5.3~6.7、 δEu 由0.34~0.62突然升高到0.3~1.6等。

(2) 栗木岩体(图3b), Li-F 花岗岩第一到第三阶段与最晚的第四阶段间稀土模式曲线同样具突变特点,早中阶段(55、56、57、58)稀土曲线呈“V”字形,相似并具连续变化,晚阶段(59)曲线则突然降低,呈平坦折线形态,表现在 ΣREE 上,由27.6~62.4 $\mu g/g$ 突然降低为2.4 $\mu g/g$, δEu 由0.15~0.23负异常突然升高到1.15的正异常等。

(3) 宜春岩体(图3c), Li-F 花岗岩第一到第三阶段(①、②、③) ΣREE 高、稀土模式曲线相似、变化连续等,至最晚的第四阶段(④、⑤), ΣREE 低,曲线突然变呈“锯齿状”和接近水平曲线, δEu 突然升高等。

(4) 大吉山岩体(图3d), 早阶段(21、22) Li-F 花岗岩曲线,呈向右倾斜曲线,晚阶段(24、25)突然变为呈中稀土高的折线形态,表现为 ΣREE 由338.9~393.2 $\mu g/g$ 突然降低为25.4~27.8 $\mu g/g$ 等,早、晚阶段 Li-F 花岗岩稀土模式曲线间,也表现出突变特点。

(5) 博罗岩体(图3e), 第一到第二阶段 Li-F 花岗岩(66、67、68、69)的稀土模式曲线呈右倾斜,具明显销负异

常和连续变化的曲线;至最晚的第三阶段钠长花岗岩(70)曲线则突然变为接近水平的平坦“折线”, δEu 由0.02~0.03突然升高到0.78,同样展示了早、晚阶段间稀土曲线的突变特点。

(6) 法国 Beauvoir 岩体(图3f), 早阶段 Li-F 花岗岩(71、72)的稀土模式曲线相似, ΣREE 相对高(25.89~47.27 $\mu g/g$), 晚阶段(73、74、75、76)的 ΣREE 突然降低为0.46~1.36 $\mu g/g$, 形态也变为折线,均显示出稀土模式曲线突变特点。

总之,不同阶段(自早至晚) Li-F 花岗岩的稀土模式变化研究表明,许多岩体晚阶段花岗岩的稀土模式曲线具突变特点:1) ΣREE 突然降低;2) δEu 突然升高;3) 模式曲线形态突然变为“锯齿状”或折线等。产生这些特点的原因作如下分析。

(1) ΣREE 从早至晚阶段 Li-F 花岗岩,通常具逐渐降低的演化趋势,反映了岩浆结晶分异中 ΣREE 逐渐减少变化,而本研究展示的最晚阶段 Li-F 花岗岩 ΣREE 则有突然降低的变化,是不能用结晶分异解释的,倒有可能是富 Li、F 花岗岩浆液态分离中不混溶的结果,形成早、中阶段与晚阶段熔体间 REE 含量一高一低,构成熔体互补格局。

(2) 从早至晚阶段 Li-F 花岗岩的分异中,多数情况是 δEu 逐渐减少,反映出其间结晶分异的演化关系,但到最晚阶段, δEu 突然升高,变为销负异常不明显,甚至变为正异常的特点,很难用结晶分异解释,倒有可能是岩浆不混溶作用结果,晚阶段 Li-F 花岗岩通常比早、中阶段富集挥发份,特别是富 Cl、F,容易与 Eu 结合为较稳定的气相络合物,使 Eu 分配系数发生大变化。在富挥发份 Cl、F 条件下,据 Flynn (1987) 和 London (1989) 资料,分配系数 D_{LM}^{Eu} (L=流体、M=熔体)变得大于1,由于分配系数大,所以富 Cl、F 等挥发份的晚阶段 Li-F 花岗岩自然应富 Eu,与早、中阶段有相反的变化,构成 δEu 一大一小的互补格局,是岩浆不混溶作用的反映。

(3) 晚阶段 Li-F 花岗岩稀土模式曲线形态突然变为“锯齿状”或折线,这是由于晚阶段 Li-F 花岗岩熔体高度富集 Li、F、Cl、 H_2O …, 挥发份在地壳浅处(近地表)可使 REE 发生分馏,导致 Cl^- 、 F^- 与单稀土元素形成络合物在熔体中迁移速度发生差异,从而形成这种“锯齿状”或折线形态。Flynn (1987) 实验表明,分配系数 $D_{LM}^{Eu} > D_{LM}^{Ce} > D_{LM}^{Yb}$, 即 Eu、Ce 在强烈富挥发份流体的熔体中,分配系数要大于 Yb,结合单稀土元素络合物在熔体中迁移速度的差异等,都可能是造成曲线呈“锯齿状”或折线的重要原因。

① $\Sigma REE = La \sim Lu$ 14个稀土元素丰度之和。

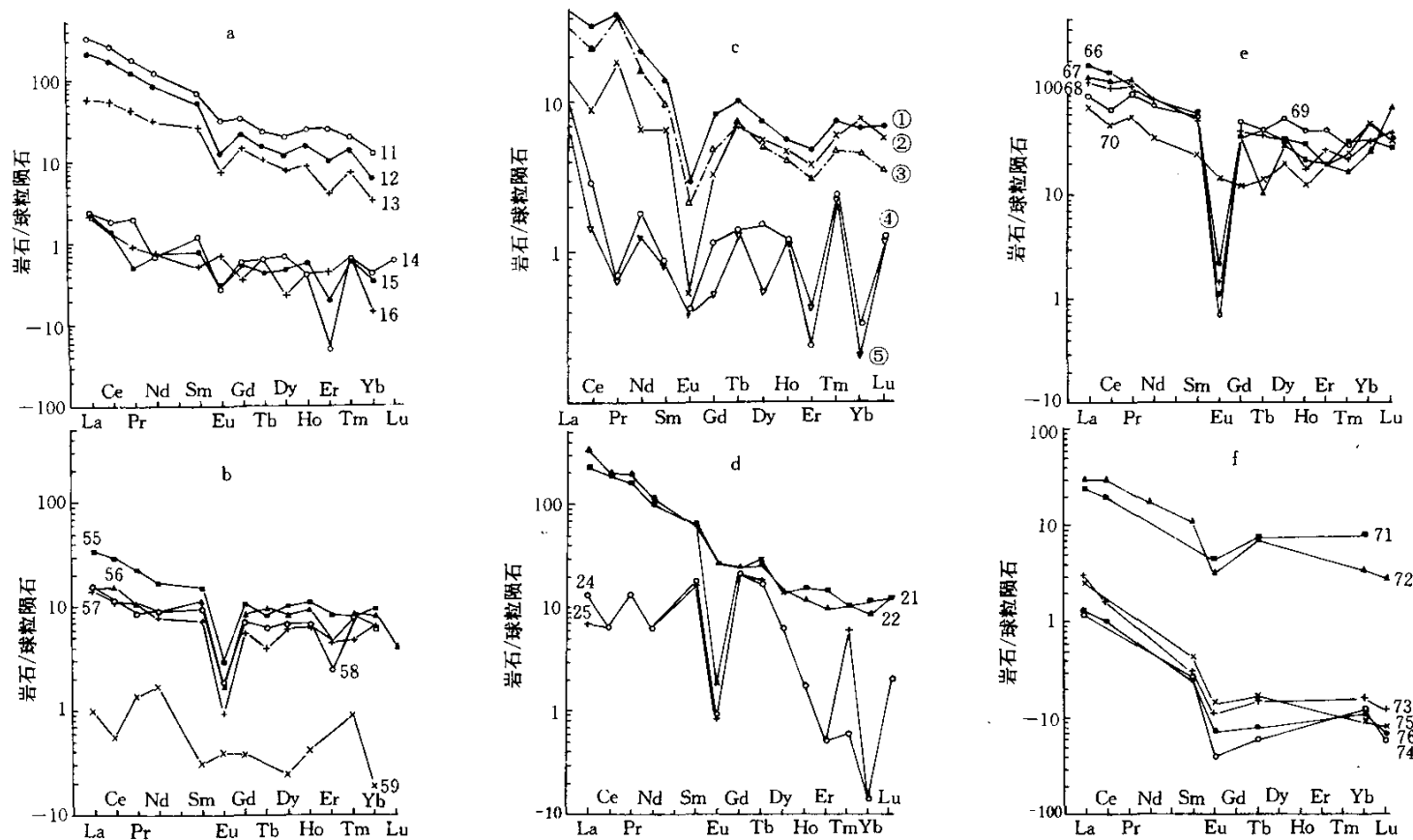


图3 Li-F花岗岩由早至晚阶段(序号小→大)稀土模式曲线演化突变类型

a. 邓阜仙岩体: 11为第一阶段粗粒斑状黑云母花岗岩和12为黑云母花岗岩, 13为第二阶段中粒二云母花岗岩, 14, 15, 16为第四阶段细粒白云母钠长花岗岩; b. 栗木岩体: 55为第一阶段中细粒二云母花岗岩, 56为第二阶段二云母花岗岩, 57, 58为第三阶段铁锂云母钠长花岗岩, 59为第四阶段富钠长石花岗岩; c. 宜春岩体(据夏卫华等(1989)的原图): ①第一阶段中粗粒斑状二云母花岗岩, ②第二阶段斑状铁白云母花岗岩, ③第三阶段板条斑状白云母花岗岩, ④第四阶段细粒多硅锂铁白云母-绿鳞云母钠长花岗岩, ⑤为细粒斑状锂云母钠长花岗岩; d. 大吉山岩体: 21为早阶段斑状黑云母花岗岩和22为黑云母花岗岩, 24, 25为晚阶段细粒白云母花岗岩; e. 博罗岩体: 66, 67, 68为第一阶段黑云母花岗岩, 69为第二阶段黑鳞云母花岗岩, 70为第三阶段钠长花岗岩; f. 法国 Beauvoir 岩体(据 Raimbault *et al.* (1995)和 Aubert(1969)): 早阶段71为微花岗岩(Pouzal-Servan)和72为浅色花岗岩(Colettes), 73, 74, 75, 76为晚阶段锂云母钠长花岗岩

Fig 3 The saltatory variation type of REE model curves evolution from early to late stages (ordinal number from small to large) in Li-F granite composite massif

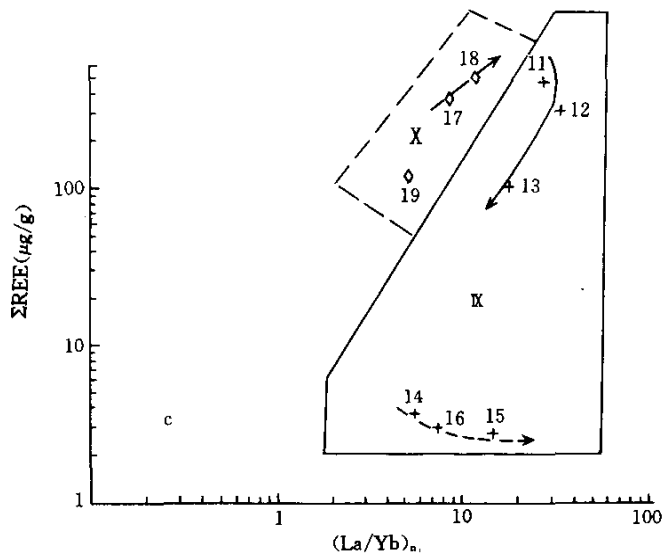
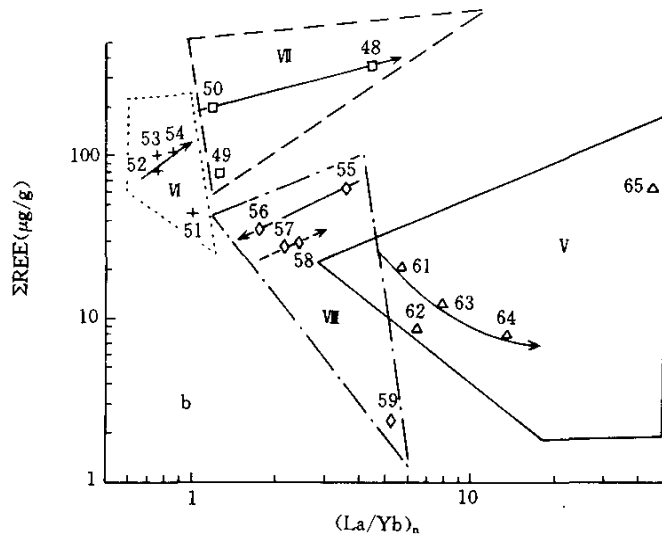
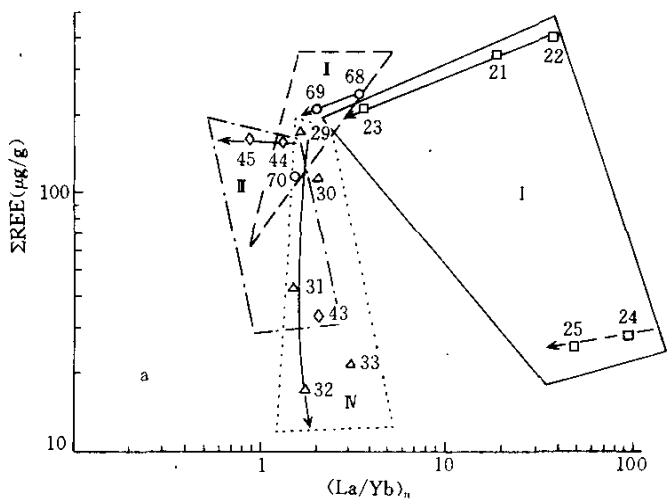


图4 不同Li-F花岗岩体在 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图中演化线
(点)分离状态

→为主演化线方向；-→为次演化线方向；多角形框为每个岩体成分点分布范围；数字为依早至晚或自下而上花岗岩不同阶段或垂直分相的岩石标本顺序排列的序号。图a中I区的□代表大吉山岩体，I区中○代表博罗岩体，II区中◇代表松岭岩体，IV区中△代表尖峰岭岩体；图b中V区的△代表宜春岩体，VI区中+代表泰顺岩体，VII区中□代表铜坑峰岩体，VIII区中◇代表栗木岩体；图c中IX区的+代表邓卓仙岩体，X区的◇代表灵山岩体

Fig. 4 The separative feature of evolution line (or composition point) for a Li-F granite massif in $\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram

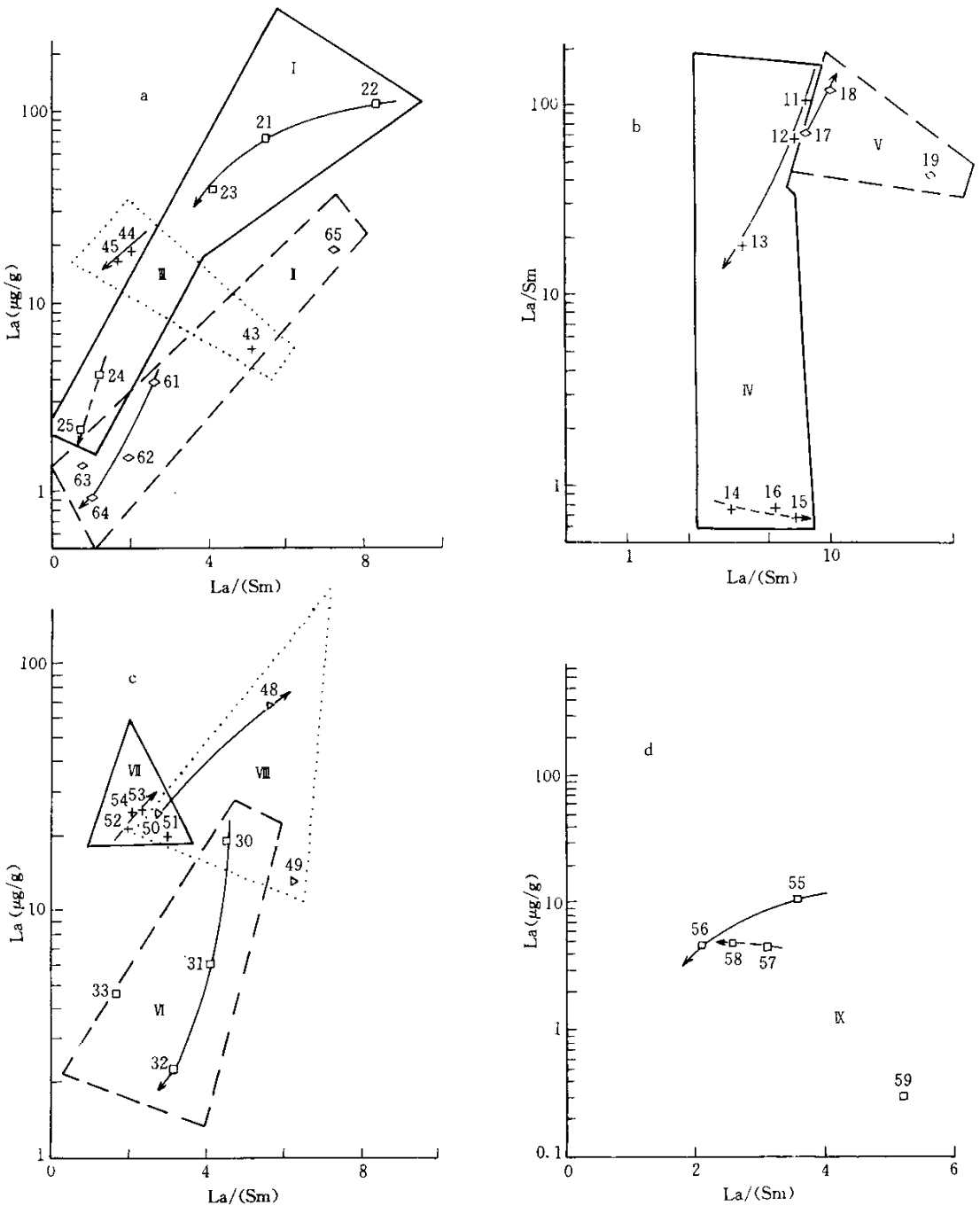


图5 不同岩体 Li-F 花岗岩在 La/Sm-La 图解中演化线(点)分离状态

→为主演化线方向; -→为次演化线方向; 数字为自早至晚或自下而上花岗岩不同阶段或垂直分相岩石标本顺序排列的序号; 多角形为每个岩体成分点分布范围; 图 a 和 I 区中的□为大吉山岩体, I 区中的◇为宜春岩体, II 区中的+为松岭岩体; 图 b IV 区中的+为邓阜仙岩体, V 区中的◇为灵山岩体; 图 c VI 区中的□为尖峰岭岩体, VII 区中的+为泰顺岩体, VIII 区中的△为铜坑嶂岩体; 图 d K 区中□为栗木岩体

Fig. 5 The separative feature of evolution line (or composition point) for a Li-F granite massif in La/Sm-La diagram

因此,晚阶段 Li-F 花岗岩 ΣREE 、 δEu 和模式曲线形态的突变,应是岩浆不混溶作用的指示剂,是判别不混溶作用的标志之一。

2 不同阶段(或不同岩相) Li-F 花岗岩在 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 中反映的液态分离作用

将10个 Li-F 花岗岩体的系统稀土分析结果,按自早至晚阶段(或自下而上不同岩相)和顺序号,投点到 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 图解(图4)中,均显示规律性排列。在图上各岩体的稀土主演化方向线与次演化方向线或与成分点呈分离状态: I 大吉山岩体(图4a),稀土主演化方向线位于岩体范围上部,由成分点22、21、23构成,次演化方向线在下部,由24、25成分点构成,很明显两者 ΣREE 相差甚远,呈分离状态; II 博罗岩体的主演化线(68、69)与成分点(70),同样呈分离状态; III 松岭岩体的主演化线(44、45)与成分点(43)以及 IV 尖峰岭岩体的主演化线(29、30、31、32)与成分点(33)均呈分离状态。在图4b中,可见 V 宜春岩体的主演化线(61、62、63、64)与成分点(65)、VI 泰顺岩体的主演化线(52、53、54)与成分点(51)、VII 铜坑嶂岩体的主演化线(50、48)与成分点(49)以及 VIII 栗木岩体的主演化线(55、56)与次演化线(57、58)和成分点(59),均呈分离状态。在图4c中,也可见 IX 邓阜仙岩体的主演化线(11、12、13)与次演化线(14、16、15)以及 X 灵山岩体的主演化线(17、18)与成分点(19),也都呈分离状态。所以10个 Li-F 花岗岩体稀土在 $\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 图上,主演化线与次演化线或与成分点呈分离状态是清楚的。根据稀土模式演化类型和地质特点分析,这种稀土演化线、点位置的分离状态,反映了 Li-F 花岗岩的不混溶作用,在液态分离中形成两个不混溶的互补熔体,导致 ΣREE 于两熔体中呈一高一低或 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 一高一低的互补格局。

该图还表明,各岩体稀土主演化方向线很多(大吉山、博罗、栗木、邓阜仙)指向左下方,代表了自早至中晚阶段 Li-F 花岗岩 ΣREE 降低和 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 变小的变化趋势,反映了早、中阶段 Li-F 花岗岩浆的结晶分异作用,剩下的另一部分岩体(泰顺、铜坑嶂等)的稀土主演化方向线相反,指向右上方,代表岩体自下而上随不同岩相变化, ΣREE 升高和 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 变大,与前述稀土模式反向演化类型一致,是气液分馏为主的液态分离结果。

3 不同阶段(或不同岩相) Li-F 花岗岩在 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 中反映的液态分离作用

$\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解(图5)的资料和作图方法与图4相同,在图5a (I 大吉山、II 宜春、III 松岭)、图5b (IV 邓阜仙、V 灵

山)、图5c (VI 尖峰岭、VII 泰顺、VIII 铜坑嶂)和图5d (IX 栗木)中的 Li-F 花岗岩体主演化线与次演化线或与成分点均呈分离状态,它代表了 Li-F 花岗岩不混溶为主的液态分离作用,其特点为 La/Sm 或 La ($\mu\text{g}/\text{g}$) 在各岩体中均呈一高一低的互补格局,反映了 Li-F 花岗岩浆不混溶作用分离成两种熔体,它们的 La/Sm 或 La ($\mu\text{g}/\text{g}$) 含量具互补或共轭特点

同样大部分岩体(大吉山、宜春、尖峰岭、邓阜仙、栗木)的稀土主演化方向线指向左下方,与图4类似,代表 Li-F 花岗岩早、中阶段的结晶分异作用,随结晶分异 La/Sm 与 La 均有降低变化;而少数岩体(泰顺、铜坑嶂等)的稀土主演化方向线的方向相反,指向右上方,反映了随岩体自下而上不同岩相的 La/Sm 和 La 含量均有升高变化,可能是挥发份 Cl 和 La 形成的络合物较其他稀土元素更稳定,在熔体中呈气相向上迁移更远,结果导致垂直剖面越向上越富集 La ,而且 La/Sm 比增大,是气液分馏为主的液态分离结果。

4 小结

1. Li-F 花岗岩稀土模式演化突变类型和 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 、 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解中稀土主演化方向线与次演化方向线或与成分点呈分离状态,一致表明在 Li-F 花岗岩中,尤其演化至晚阶段岩浆,产生不混溶为主的液态分离。

2. Li-F 花岗岩稀土模式反向演化类型和 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 、 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解中稀土主演化方向线指向图的右上方,均代表 Li-F 花岗岩气液分馏为主的液态分离。

致谢 在成文过程中得到于津生研究员热情帮助,作者表示衷心感谢。

References

- Aubert G. 1969. Les coupoles granitiques de Montebas et d'Echassières (Massif Central Français) et la genese de leurs mineralisations en etain, tungstene, lithium et bergllium. Mem BRGM, 11:46
- Eugster H P and Wilson G A. 1985. Transport and deposition of ore-forming elements in hydrothermal systems associated with granites. in: Halls C. ed., High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis; Institute of Mining and Metallurgy, 87~98
- Flynn R T and Burnham C W. 1978. An experimental determination of rare earth partition coefficients between a chloride containing vapor phase and silicate melts. Geochim. Cosmochim. Acta, 42: 685~701
- Granite research group of Nanling Project in Ministry Geology-Ore Resources. 1989. Geology, origin and metallization in Nanling granites. Geological Publishing House (in Chinese)
- Gan G L. 1988. Main characteristics and REE-evolution of Huangsha

- granites in Jiangxi Province, China. Bull. of Yichang Inst. Geol. Mineral Resour. CAGS, 13 : 50~60 (in Chinese)
- Hildreth E W. 1979. The Bishop tuff: Evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chambers. Geol. Soc. of America Special Publication, 180 : 73~75
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. Geochemistry of South China granites. Beijing : Science Press (in Chinese)
- Liu Changshi, He Bozhu, Zhou Liang, *et al.* 1993. Discussion on genesis of topaz-granitic rocks in SE-Jiangxi Province, China. Geotectonica et Metallogenia, 17 (1) : 39~51 (in Chinese)
- London D, Hervig R L and Morgan G B V I. 1988. Melt-vapor solubilities and elemental partition in peraluminous granite-pegmatite systems. Experimental results with Macusani glass at 200MPa. Contrib. M. & P. 99 : 360~373
- Mei Yongwen, Ye Jingping and Zhu Yuanzao *et al.* 1994. Prediction of concealed tin-polymetal ore deposits in South Jiangxi Area, China. Geological Publishing House (in Chinese)
- Raimbault L, Cuneg M and Azencott C *et al.* 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in granite at Beauvoir, French Massif Central. Econ. Geol. 90 (3) : 548~576
- Song Xianghua and Zhou Xuruo. 1992. Tectonic setting, magmatic source and evolution of Dengfuxian granite. Geoscience (Journal of Graduate School, China University of Geosciences), 6 (4) : 458~468 (in Chinese with English abstract)
- Taylor R P. 1992. Petrological and Geochemical Characteristics of the Peasant Ridge Zinnwaldite-Topaz Granite, Southern New-Brunswick and Comparisons with Other Topaz-Bearing Felsic Rock. Canadian Mineralogist, 30 : 895~921
- Wang Dezi, Liu Changshi and Shen Weizhou *et al.* 1994. The Yangbin topaz porphyry, Taishun, Zhejiang Province-Geochemical characters and genesis. Geochimica, (2) : 115~123 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Zhang Yuquan and Liu Shixian. 1975. Multiple implacements and some geochemical characteristics of the Zhuguanshan granitic Batholith, South China. Geochimica, (3) : 189~201 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Zhu Weifang and Zhang Shaoli. 1982. On the evolution of two petrogenetic and mineralized series of granites in South China. Geochimica, (4) : 329~339 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Zhu Weifang and Zhang Shaoli. 1983. Liquid segregation as a differentiation in Nanling granite. Geological Reviews, (4) : 365~373 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Zhu Weifang, Zhang Shaoli, *et al.* 1987 (1). An experimental study on liquid segregation of Nanling granites. Scientia Sinica (Series B), (1) : 79~87 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Zhang Shaoli and Yang Wenjin *et al.* 1987 (2). Petrogenesis and mineralization in the rare-metal granites. Geology and Ore Prospecting, 23 (1) : 44~54 (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui, Wang Huifen and Huang Zhilong. 1997. Discovery on the three end-members components of Li-F granite rock and its liquid-state segregation origin. Geology and Prospecting, 33 (3) : 11~20 (in Chinese with English abstract)
- Xia Hongyuan and Liang Shuyi. 1991. The metallogenetic series of W-Sn-rare metal granites in South China. Beijing : Science Press (in Chinese)
- Xia Weihua, Zhang Jintong and Feng Zhiwen. 1989. Geology of rare metal ore deposits for the Nanling granite type. Publishing House of China University of Geosciences (in Chinese)
- Zhou Fengying. 1994. Geochemical studies on the magmatic-hydrothermal transition stage for some F-rich granites in South China. PhD graduate paper for Nanling University (in Chinese)
- Zhu Jinchu and Xu Shijiu. 1989. REE partterns of tin/tungsten-bearing granites in South China and their petrogenetic implications. Mineral Deposits, 8 (3) : 21~31 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社
- 干国梁. 1988. 江西黄沙花岗岩的基本特征和其稀土演化. 宜昌地质矿产研究所所刊, 13号, 50~60
- 刘昌实, 贺伯初, 周亮等. 1993. 赣东南含黄玉花岗岩质岩石的成因初探. 大地构造与成矿学, 17 (1) : 39~57
- 梅勇文, 叶景平, 朱元早等. 1994. 赣南地区锡多金属隐伏矿床预测研究. 北京: 地质出版社
- 宋新华和周珣若. 1992. 邓阜仙花岗岩的构造环境、岩浆来源与演化. 现代地质, 6 (4) : 458~468
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲等. 1994. 浙江泰顺洋滨黄玉斑岩地球化学特征和成因. 地球化学, (2) : 115~123
- 王联魁, 张玉泉, 刘师先. 1975. 南岭诸广山花岗岩体的多次侵入活动和某些地球化学特征. 地球化学, (3) : 189~201
- 王联魁, 朱为芳, 张绍立. 1982. 华南花岗岩两个成岩成矿系列的演化. 地球化学, (4) : 329~339
- 王联魁, 朱为芳, 张绍立. 1983. 液态分离——南岭花岗岩分异方式之一. 地质论评, (2) : 365~372
- 王联魁, 卢家烂, 张绍立等. 1987 (1). 南岭花岗岩液态分离实验研究. 中国科学 (B), (1) : 79~87
- 王联魁, 张绍立, 杨文金等. 1987 (2). 稀有元素花岗岩成岩成矿作用. 地质与勘探, 23 (1) : 44~54
- 王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 1997. 锂氟花岗岩质岩石三端元组分的发现和其液态分离成因. 地质与勘探, 33 (3) : 11~20
- 夏宏远, 梁书艺. 1991. 华南钨锡稀有金属花岗岩矿床成因系列. 北京: 科学出版社
- 夏卫华, 章锦统, 冯志文. 1989. 南岭花岗岩型稀有金属矿床地质. 中国地质大学出版社
- 中国科学院地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社
- 周凤英. 1994. 华南某些富氟花岗岩浆-热液过渡阶段的地球化学研究. 南京大学博士论文
- 朱金初, 徐士进. 1989. 华南含锡钨花岗岩的稀土元素地球化学特征和岩石成因. 矿床地质, 8 (3) : 21~31