

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

## 南岭地区高度演化花岗岩类的 稀土元素模型

吴澄宇

朱正书

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京) (中国地质科学院成矿远景区划室, 北京)



本文应用现有的理论模型和矿物/熔体分配系数讨论南岭地区高度演化花岗岩类的 REE 模型, 包括重稀土富集型和稀土亏损型。在花岗岩浆分异演化过程中, 副矿物 (尤其是稀土矿物) 的晶出种类、顺序和物理化学条件是控制 REE 强烈分馏的关键因素。REE 分布型式不能简单地作为鉴别岩石成因的标志。

**关键词** REE 模拟 高度演化花岗岩 南岭地区

70年代微量元素模拟在解释玄武质岩石成因方面取得了极大成功<sup>[1]</sup>, 然而应用于花岗岩类时却遇到了很大困难, 其主要原因在于: 1. 副矿物相 (尤其是稀土矿物) 成为控制花岗质岩石中 REE 分馏的主导因素, 而有关副矿物的精确实验资料太少; 2. 从地壳中派生的高度演化的花岗岩浆, 往往经历了复杂的地质过程和多种作用的叠加, 因此, 简单数学模型的应用受到限制。Hanson<sup>[2]</sup>曾指出, 硅酸质熔体的温度、压力、水逸度和母体成分的较大变化, 以及较高的粘度使得现有的花岗质体系 REE 实验资料往往不能适用于岩石成因的解释。有关副矿物相的重要性被许多学者所强调, Miller 等<sup>[3]</sup>认为独居石和褐帘石的晶出是造成花岗岩浆演化过程中 LREE 逐渐亏损的主要原因。Cameron 等<sup>[4]</sup>和 Michael<sup>[5]</sup>在北美一些富硅流纹岩的斑晶矿物辉石和角闪石中发现硅铈铈矿 (3—25 μm) 和独居石 (25—40 μm) 的显微包体, 因此, 以往由斑晶-基质法获得的 REE 表观分配系数的应用要慎重。对于各种稀土矿物 (如褐帘石、独居石、磷钇矿、硅铈铈矿、硅铈钇矿等), REE 作为主要化学计量组分其分配行为已不再适用亨利定律, 然而除了 Montel<sup>[6]</sup>发表的 800℃ 和  $2 \times 10^8$  Pa 条件下铈独居石在  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$  体系中的溶解度资料外, 有关稀土矿物在花岗质熔体中晶出条件的实验几乎是空白。难怪 Ohlander 等<sup>[7]</sup>在分析了瑞典北部与钼矿化有关的元古代细晶岩富 HREE 的特征主要是由磷钇矿和萤石所致之后, 认为 REE 模拟对于高度演化的花岗岩浆是无效的。

对于一个高度演化的花岗质杂岩体, 很可能经历了如下一系列过程: 深熔作用、岩浆上升过程中的同化混染作用、深部岩浆房内结晶分异作用、构造挤压状态下的涌动和脉冲、岩浆定位后的分异作用以及固结成岩过程中或之后的自交代蚀变作用。如此复杂的地质过程中的任何一个环节, 都有可能伴随岩浆主成分和微量元素 (包括 REE) 的演化。本文旨在讨论南岭地区花岗岩浆演化过程中 REE 分馏的几种可能机制, 其目的并不在于精确定量地模拟这些过程, 而是试图运用现有的理论模型揭示 REE 分馏的趋向及其影响因素, 从而为理解高度演化花岗岩的形成机制及其与稀有金属矿化的关系奠定基础。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号4880148)。  
本文1991年10月收到, 1993年6月改回, 刘淑春编辑。

# 1 南岭富重稀土花岗岩类的基本特征

吴澄宇等<sup>[8]</sup>曾详细讨论了南岭地区富重稀土花岗岩类的地质、地球化学特征，它们无例外地属于高度演化的花岗岩，其主要特点是：

(1) 广泛分布于江南地背斜和华南褶皱系中不同的地质构造单元，形成时期主要集中于雪峰期和燕山期。

(2) 一般为多期复式岩体的晚期相（补体）或多相分带岩体的边缘相、顶部相，亦或为独立的小岩株。岩石富硅（ $\text{SiO}_2$  72%—78%）和过铝质（ $A/CNK \geq 1.1$ ），属钙碱—次碱性，并富含不相容微量元素 Rb、Th 和挥发组分 F，贫 Sr、Ba 及过渡族元素。

(3) 主要矿物为：石英、微斜长石（部分为正长石）、钠更长石（ $An_0-30$ ）、少量铁黑云母或铁叶云母，以及白云母（或锂白云母）。副矿物以稀有、放射性矿物组合为主，钛铁氧化物含量很低，常出现锰铝榴石。锆石群型以 G1 型为主<sup>[9]</sup>，具低的  $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$  值。

(4) 岩石具高的铈初始比值（0.710—0.732），长石富含放射性成因铅<sup>[9]</sup>； $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为低负值，且出现异常钆模式年龄（ $t_{\text{DM}}$ ），即为负值年龄或大于地球年龄<sup>[10]</sup>。

(5) 有关的蚀变作用包括：钾长石化、钠长石化、云英岩化、黄玉化、萤石化、绢（白）云母化和碳酸盐化等，经常伴有钨、锡、铋钼矿化。

根据岩石中 REE 含量和分布型式，可以划分出三种主要类型（表 1），其中第二和第三类相当于朱金初等<sup>[11]</sup>所划分的重稀土富集型（Ⅲ）和稀土亏损型（Ⅳ），后者可进一步区分为三种情况（表 1，图 1）。过渡型的特征则介于朱金初等的正常型（Ⅰ）和重稀土富集型之间<sup>[11]</sup>。显然，这是一个花岗岩浆逐渐向更富集超亲石元素方向演化的序列，最晚期的稀土亏损型钠长花岗岩常伴有铋钼矿化，REE 极度贫化（ $\leq 50 \times 10^{-6}$ ），然而其 LREE/HREE 值却变化非常大，从  $< 1$  或  $\approx 1$ （如栗木<sup>[18]</sup>、黄沙—铁山笼<sup>[21]</sup>）变化到  $> 1$ （如邓阜仙<sup>[18]</sup>、灵山<sup>[20]</sup>和大吉山<sup>[22]</sup>），且 REE 分布图形呈现多种型式，包括“海鸥型”（或“V”型）、“Y”型和“M”型（图 1）。南岭地锂白云母钠长花岗岩的岩石学特征与栗木等岩体相似，但 REE 含量却高达  $250 \times 10^{-6}$  以上<sup>[23]</sup>。以上

表 1 南岭地区高度演化花岗岩类的 REE 特征  
Table 1 REE characteristics of highly evolved granitic rocks from Nanling Mountains

类型	主要岩石类型	$\Sigma\text{REE} (\times 10^{-6})$	$\frac{\text{LREE}}{\text{HREE}}$	$\left(\frac{\text{La}}{\text{Sm}}\right)_N$	$\left(\frac{\text{Gd}}{\text{Yb}}\right)_N$	$\delta\text{Eu}$	图型特征	代表性岩体
过渡型	二长花岗岩，部分钾长花岗岩	80—120	$\leq 1$	$\approx 1$	$\leq 1$	0.1—0.3	两翼近水平的“海鸥”型	平英、元宝山 <sup>[12]</sup>
重稀土富集型（Ⅲ） <sup>[11]</sup>	钾长花岗岩，碱长花岗岩	250—350	$< 1$	$\leq 1$	$< 1$	$< 0.1$	两翼左倾或近水平的“海鸥”型	足洞 <sup>[13]</sup> 、西华山 <sup>[14]</sup> 、银岩 <sup>[15]</sup> 、大田 <sup>[16]</sup> 、仙家洞 <sup>[17]</sup>
稀土亏损型（Ⅳ） <sup>[11]</sup>	钠长花岗岩	35—50	$\leq 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	$< 0.1$	两翼近水平的“海鸥”型	栗木 <sup>[18]</sup> 、黄沙—铁山笼 <sup>[21]</sup>
			$\geq 1$	$> 1$	$< 1$	$< 0.1$	“Y”字型	灵山 <sup>[20]</sup> 、香花岭 <sup>[19]</sup>
			$\geq 1$	$< 1$	$> 1$	$< 0.1$	“M”字型	大吉山 <sup>[22]</sup>

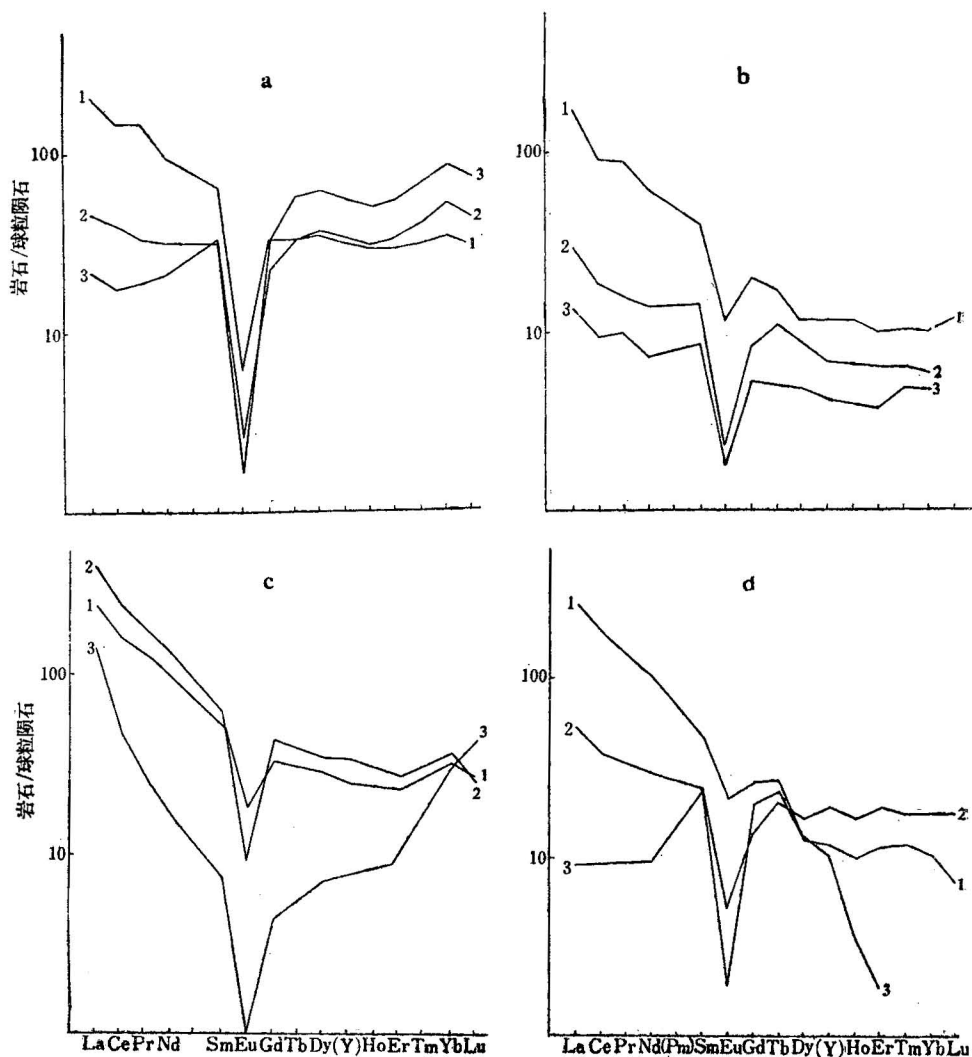


图 1 南岭地区高度演化花岗岩的几种代表性REE球粒陨石标准化型式

Fig. 1 Representative chondrite-normalized REE patterns of highly evolved granitic rocks from Nanling Mountains

a. 大东山岩体<sup>[9]</sup>: 1—第一期中粗粒黑云母花岗岩; 2—第二期中粒黑云母花岗岩; 3—第三期细粒白云母碱长花岗岩  
 b. 大厂岩体<sup>[18]</sup>: 1—第一阶段斑状黑云母花岗岩; 2—第二阶段黑云母花岗岩; 3—第三阶段白岗岩, 为近于海鸥型的分布型式  
 c. 灵山岩体<sup>[20]</sup>: 1—粗粒似斑状角闪黑云母花岗岩; 2—中粗粒黑云母花岗岩; 3—黑鳞云母钠长花岗岩, 为“Y”型分布型式  
 d. 大吉山岩体<sup>[22]</sup>: 1—中粗粒斑状黑云母花岗岩; 2—中细粒白云母碱长花岗岩; 3—细粒白云母碱长花岗岩, 为“M”型分布型式

a. Dadongshan pluton<sup>[9]</sup>: 1—phase I medium- to coarse-grained biotite granite; 2—phase II medium-grained biotite granite; 3—phase III fine-grained muscovite alkaline feldspar granite  
 b. Dachang pluton<sup>[18]</sup>: 1—stage I porphyritic biotite granite; 2—stage II biotite granite; 3—stage III alaskite, nearly “Sea gull” type pattern  
 c. Lingshan pluton<sup>[20]</sup>: 1—coarse-grained porphyritic hornblende biotite granite; 2—medium- to coarse-grained biotite granite; 3—protolithionite albite granite, “Y” type pattern  
 d. Dajishan pluton<sup>[22]</sup>: 1—medium- to coarse-grained porphyritic biotite granite; 2—medium- to fine-grained muscovite alkaline feldspar granite; 3—fine-grained muscovite alkaline feldspar granite, “M” type pattern

事实表明, REE 在岩浆演化过程中并非遵循单一的轨迹, 而是受多种因素控制, 包括源岩的性质及其中的 REE 含量和分布、岩浆的成分和挥发分含量、围岩的混染作用及其程度, 以及控制副矿物晶出种类和顺序的物理化学环境。高度演化的花岗岩浆是 HREE 聚集的必要条件, 但不是充分必要条件<sup>[9]</sup>。

## 2 几种可能的稀土元素模型

### 2.1 两阶段模型

假定深熔作用与岩浆分异作用是相互独立的过程, 因此, 可以把它们分为彼此衔接但互不影响的两个阶段, 分别运用部分熔融和分离结晶模型来描述岩浆中 REE 的变化行为。已有不少学者较成功地运用部分熔融模型解释南岭地区演化程度较低的富 LREE 花岗岩类的成因。例如, 袁忠信等<sup>[20]</sup>以双桥山群千枚岩为源岩, 运用实比批式熔融模式, 当  $F=0.3$  时, 得到灵山岩体第一期角闪黑云母花岗岩 ( $\gamma_2^{2-2^*}$ ) 的 REE 型式。凌雯等<sup>[24]</sup>用同样的模式讨论了华南 30 个岩体的 REE 特征。马大铨等<sup>[17]</sup>采用非实比批式熔融模型较好地再现了石菴和岗尾岩体以及塘口岩体早期的 REE 型式。这些研究表明, 对于演化程度较低的花岗岩类 (如花岗闪长岩、角闪黑云母二长花岗岩等) 完全可以采用批式熔融模型来描述, 它相当于这里讨论的第一个阶段, 即深熔作用阶段。

单纯的部分熔融作用得不到高度演化的富 HREE 的特征, 原因在于: 1. 构成地壳主体的各种沉积岩类和花岗质岩石均相对富集 LREE; 2. 深熔作用残余物 (角闪石、辉石、石榴石、锆石等) 均具有较大的  $D_{\text{HREE}}$  值<sup>[25]</sup>。但在分离结晶过程中情况则大不相同, REE 的分馏完全受不同副矿物晶出顺序和含量的控制。刘姝群等<sup>[26]</sup>曾运用分离结晶模型讨论南岭某些与锡多金属矿床有关的花岗岩浆演化问题, 由于未考虑副矿物相, 得到的是一般的富 LREE 型式。Plant 等<sup>[27]</sup>在晶出相中加入了 0.1% 的褐帘石 (或独居石) 便得到两翼近于水平的“海鸥”型模式, 与苏格兰 Cairngorm 高热 (HHP) 花岗岩相吻合。为了更具一般性, 笔者以南岭二长花岗岩 REE 平均值 (MGA) 作为第一阶段得到的岩浆 (初始熔体  $C_i^0$ , 表 4) 来讨论第二阶段 (分离结晶作用) 的 REE 模型。分离结晶公式为:

$$C_i^1/C_i^0 = F^{(D_i-1)} \text{ 和 } D_i = C_i^1/C_i^0$$

其中  $C_i^1$ 、 $C_i^0$  和  $C_i^2$  分别为剩余熔体、初始熔体和晶出相中元素  $i$  的浓度;  $F$  为熔体分数;  $D_i = \sum f_x D_i(x)$  ( $x=1, 2, \dots, n$ ) 为总体分配系数;  $f_x$  为矿物  $x$  的重量百分比;  $D_i(x)$  为矿物/熔体分配系数。选用的  $D_i(x)$  列于表 2。从表 2 不难看出, 长石对 Eu 的分馏起很大作用, 褐帘石富集 LREE, 磷灰石和榍石主要对 MREE 起作用, 而 HREE 的晶出主要靠锆石、石榴石和角闪石, 黑云母和磁铁矿几乎对总体分配系数无影响。表 3 列出了分离结晶的 4 种模式成分, 其主要造岩矿物组成相当于角闪黑云母二长花岗岩, 其中石英的  $D_i(x)$  近似为 0。图 2 左为模型 1 结晶相和残余熔体中 REE 含量经球粒陨石标准化后的变化曲线。早期晶出相 ( $F=0.9$ ) 为无 Eu 亏损的简单右倾曲线, 相应的残余熔体逐渐亏损 LREE, 富集 HREE; 当  $F=0.1$  时, 残余熔体呈现典型向左倾斜的 HREE 富集型式。褐帘石对此过程起决定性作用, 正如图 2 右所示, 当褐帘石晶出量降为 0.1% 时, LREE 的亏损便显著减弱了。

模型 2 至 4 代表晶出过程中 REE 强烈亏损的 3 种情况 (图 3)。模型 2 中所有富含稀土的矿物均被大量移出; 模型 3 以富含 MREE 的榍石和磷灰石晶出为主; 而模型 4 则以褐帘石和锆石、石榴石移出为主。它们分别代表了大厂、灵山和大吉山 3 种类型 (图 1)。显然, 为了获得预想的型式, 笔者给定的副矿物含量比自然界实际情况偏高。地质证据表明, 早期较富钙的熔体有利

表 2 用于模型计算的矿物/熔体分配系数 ( $D_i(x)$ )Table 2 REE mineral/melt partitioning coefficients ( $D_i(x)$ ) for modeling calculation.

矿物名称 (缩写符号)	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb
斜长石 (Pl)	0.24	0.19	0.13	2.0	0.16	0.13	0.05	0.8
碱性长石 (Or)	0.04	0.03	0.02	1.13	(0.01)	0.006	0.006	0.012
角闪石 (Hb)	1.2	3.2	5.4	3.6	(3.3)	9	8	6.2
黑云母 (Bi)	0.32	0.29	0.26	0.24	0.28	0.29	0.35	0.44
磁铁矿 (Mt)	0.6	0.9	0.9	0.6	0.8	(0.8)	(0.8)	0.4
磷灰石 (Ap)	31	50	54	27	22	42	31	21
榍石 (Sph)	53.3	88.3	102	101	102	80.6	58.7	37.4
褐帘石 (All)	635	460	205	80	130	(50)	(20)	8.9
锆石 (Zr)	4.2	3.6	4.3	3.4	(25)	48	140	280
石榴石 (Gar)	0.62	0.63	2.2	0.7	7.7	29	43	43

注: 黑云母的值据文献[28], 其余引自文献[25]。

表 3 用于模拟计算的矿物模式成分 (%)

Table 3 Mineral model composition (%) for modeling calculation

模 型	编 号	石 (Q)	英 (Pl)	斜长石 (Or)	钾长石 (Hb)	角闪石 (Bi)	黑云母 (Mt)	磁铁矿 (Ap)	磷灰石 (Sph)	榍石 (All)	褐帘石 (Zr)	锆石 (Gar)	石榴石	$\Sigma$	描 述 <sup>①</sup>
二 阶 段 模 型	1	25	35	31	3	5	0.6	0.02	0.08	0.15	0.02	0	99.9	以MGA为 $C_0^1$ 的 分离结晶过程	
	2	23.6	35	31	3	5	0.6	0.5	0.8	0.15	0.25	0.05	99.9		
	3	23.3	35	31	3	5	0.6	0.5	1.5	0.05	0.008	0	99.9		
	4	23.4	35	31	3	5	0.6	0.5	0.5	0.2	0.28	0.5	99.9		
联 合 作 用 模 型	5	25	35	31	3	5	0.6	0.03	0.05	0.15	0.02	0	99.9	以MGA为 $C_0^1$ ; ZMR为 $C_0^2$ 的联 合作用过程	
叠 加 重 熔 模 型	6	25	35	31	3	5	0.6	0.03	0.08	0.2	0.02	0	99.9	以MGA为 $C_0^1$ 的 实比批式熔融	
	7	25	35	31	3	5	0.6	0.03	0.03	0.15	0.01	0.05	99.9	以CGA为 $C_0^1$ ; (1), 0.3F产物为 $C_0^2$ (2)批式熔融	
	8	25	35	31	3	5	0.6	0.03	0.1	0.2	0.08	0.05	100.1	以ZMR为 $C_0^1$ ; (1), 0.3F残余物为 $C_0^2$ (2)批式熔融	

① 详见正文及表2和表4。MGA 南岭二长花岗岩平均值; CGA 加里东期花岗岩平均值; ZMR 震旦纪-前震旦纪变质岩平均值。

于榍石、磷灰石、褐帘石等大量矿物的晶出, 直至钙消耗殆尽, 独居石和磷钇矿大体同时晶出。硅钇矿、褐钇铈矿、石榴石出现于更晚阶段<sup>[29]</sup>。稀土氟碳酸盐需要较高的F、 $\text{HCO}_3^-$ 逸度<sup>[30]</sup>, 它们往往是晚期交代作用的产物<sup>[13]</sup>。锆石的结晶条件受温度和阳离子比值 ( $\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}$ )/ $(\text{Si}, \text{Al})$  控制。而黄钇钽矿的形成条件范围很窄, 过量的P和F均不利于其稳定<sup>[31]</sup>。因此, 自然界岩浆中副矿物的晶出顺序是随熔体成分和F值变化的。朱振华<sup>[32]</sup>曾假定晶出瞬时固相中矿物

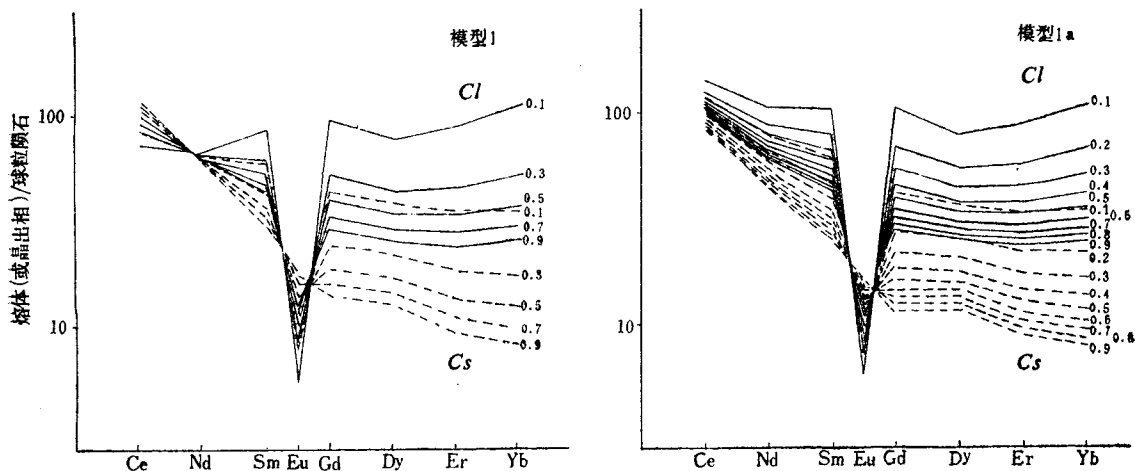


图 2 分离结晶作用过程中REE分布型式的变化

Fig. 2 Variations of REE distribution patterns during fractional crystallization

模型 1 见表 3; 模型 1a 与模型 1 的差别仅在于晶出相中褐帘石的含量为 0.1%; 虚线为结晶相 ( $C_s$ ); 实线为熔体相 ( $C_l$ )  
See Table 3 for Model 1; the only difference between Model 1 and 1a is that the crystallized phase of the latter contains 0.1% allanite instead of 0.15%; dashed line, crystallized phase ( $C_s$ ); solid line, residual melt ( $C_l$ )

的质量分数和分配系数均为固化程度 ( $F_s$ ) 的连续、分段光滑函数, 推导出一个新的模型, 它可以更方便地调整计算参数。但是目前尚缺少有关分配系数随熔体成分变化的资料, 对晶出矿物质量分数的人为改变也仅仅是一种数学调整, 而不是依物理化学条件得到的制约。可以推断, 随  $F$  值改变, 如果用独居石和磷钇矿分别取代一部分褐帘石和锆石, 不仅可以获得同样的分馏效果, 而且更符合自然界的实际情况, 这要求获得有关独居石、磷钇矿的实验资料, 而且必须依据“饱和度”的概念建立新的数学模型。

## 2.2 联合作用模型

Wetzel 等<sup>[33]</sup>最近建立了分离部分熔融和分馏结晶联合作用下的痕量元素模型 (FPMC 模型)。该模型假定由熔融区产生的岩浆不断经通道迅速移至上部的岩浆房, 与此同时岩浆房中则发生着瑞利分馏结晶作用。假设岩浆的补给速率 ( $W_s$ ) 和结晶速率 ( $W$ ) 之比值 ( $\rho = W_s/W$ ) 为常数, 当  $\rho \gg 1$  时, 熔体的成分取决于熔融过程; 当  $\rho \ll 1$  时, 则基本相当于岩浆房中的分离结晶作用过程; 而当  $0 < \rho < 1$  时, 部分熔融和分离结晶将产生相互作用, 从而影响痕量元素的分馏。Wetzel 等<sup>[33]</sup>假定熔体分数和残留固相的分数均受一级动力学过程控制, 当其速度常数之比 ( $k = k'/k'$ ) 为 1 时, 有:

$$\frac{C^l(t)}{C^l(0)} = F^l(t)^{-z} + \left(\frac{\rho}{\rho-1}\right) \left[ \frac{C^s(0)}{D \cdot (Z - \frac{D-1}{D})} \right] \cdot \frac{1}{C^l(0)} [F^l(t)^{-(D-1)/D} - F^l(t)^{-z}]$$

式中  $C^l(t)$  和  $C^l(0)$  分别为  $t$  和  $t_0$  时刻熔体中某元素的浓度;  $C^s(0)$  为源岩中该元素含量,  $D$  为总体分配分数;  $F^l(t)$  为  $t$  时刻的熔体分数;  $Z = (\rho + D - 1)/(\rho - 1)$ 。当  $k \neq 1$  时, 该模型为一个较复杂的积分式。选用南岭地区震旦纪-前震旦纪变质岩 (板岩、千枚岩等) REE 平均值 (ZMR) (表 4) 作为  $C^s(0)$ , 二长花岗岩平均值 (MGA) 作为  $C^l(0)$ <sup>[23]</sup>, 以模型 5 作为模式结晶成分

① 原文用  $F$  表示固化程度, 这里改用  $F_s$  以区别于熔体分数, 且有  $F_s = 1 - F$ 。

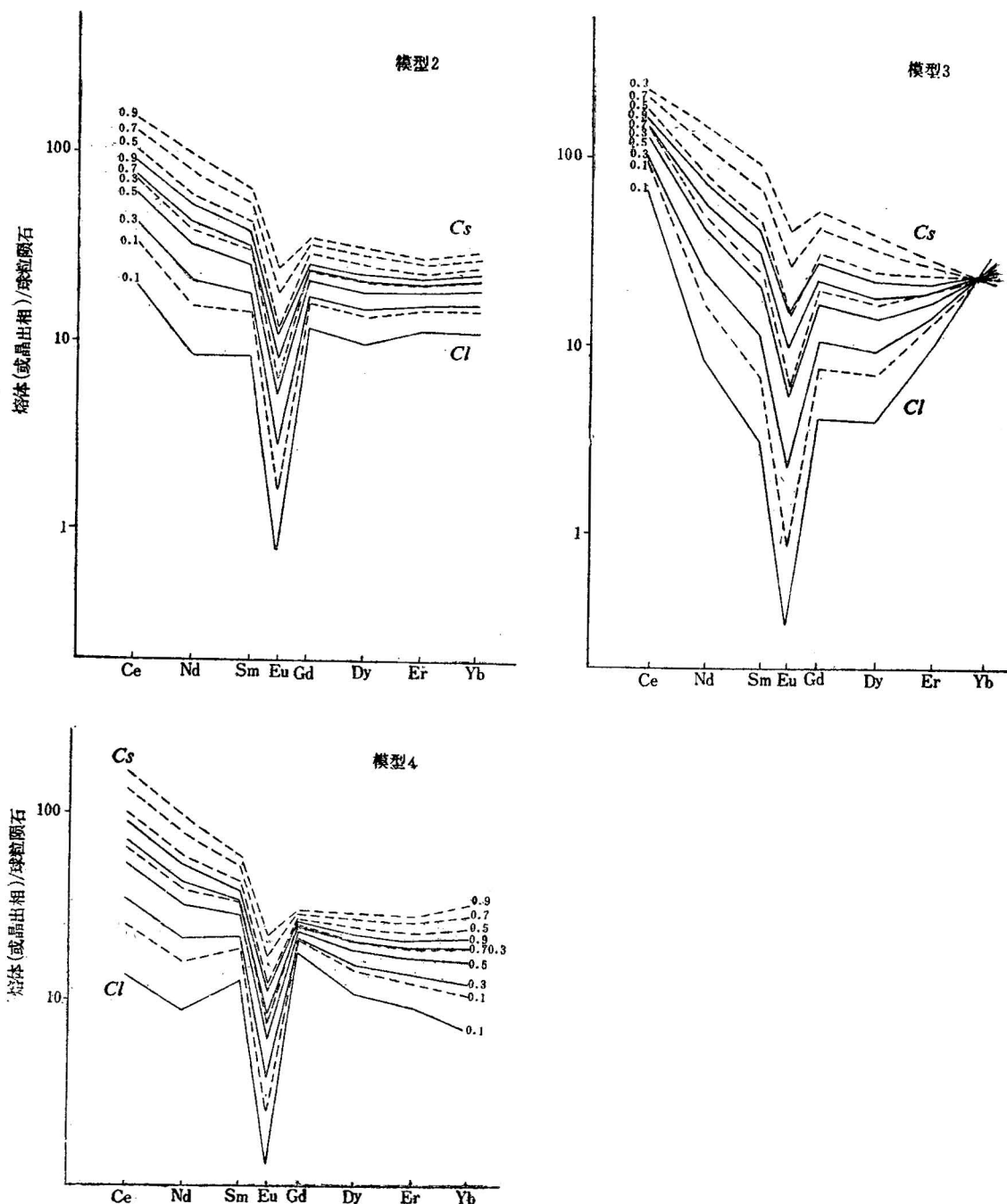


图 3 分离结晶作用过程中REE分布型式的变化

Fig. 3 Variations of REE distribution patterns during fractional crystallization

模型 2、3 和 4 代表 REE 极度亏损的 3 种情况, 详见正文。实线为残余熔体 (CI); 虚线为结晶相 (Cs)  
 Model 2, 3 and 4 represent three examples of REE extreme depletion. See text for details. solid line,  
 residual melt (CI); dashed line, crystallized phase (Cs)

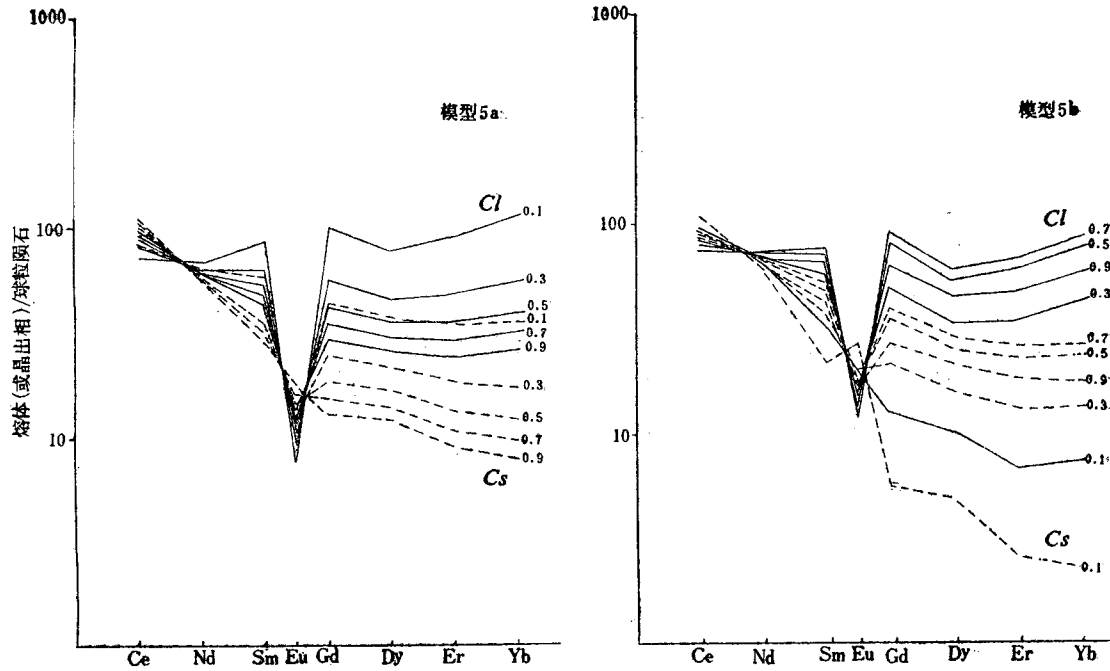


图 4 分离熔融和分馏结晶联合作用过程中REE型式的变化

Fig. 4 Variations of REE distribution patterns for combined fractional partial melting and crystallization process

模型5a:  $k=1$ ,  $\rho=0.1$ ; 模型5b:  $k=1$ ,  $\rho=0.9$ . 详见正文<sup>[33]</sup>. 实线: 残余熔体 (CI); 虚线: 结晶相 (Cs)  
Model 5a:  $k=1$ ,  $\rho=0.1$ ; Model 5b:  $k=1$ ,  $\rho=0.9$ . See text for details<sup>[33]</sup>. solid line: residual melt (CI); dashed line: crystallized phase (Cs)

表 4 南岭地区部分花岗岩和变质岩 REE 丰度 ( $\times 10^{-6}$ )Table 4 REE abundance ( $\times 10^{-6}$ ) of granites and metamorphic rocks from Nanling Mountain area

岩石类型	缩写符号	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	资料来源
南岭二长花岗岩平均值	MGA	78.9	34.2	7.8	0.89	6.9	7.4	4.5	4.8	[23]
南岭加里东期花岗岩平均值	CGA	76.6	33.6	7.0	1.1	5.9	5.5	3.1	2.9	[23]
南岭地区震旦-前震旦纪变质岩平均值	赣南	80.8	43.6	9.1	1.6	7.5	5.8	3.2	3.0	[14]
	粤北	95.1	39.7	5.9	1.4	5.6	5.0	2.9	3.0	[34]
	粤西	49.1	34.0	7.2	1.4	5.2	5.7	2.9	3.0	[35]
	桂北	80.1	35.7	7.4	1.4	6.9	6.0	3.4	3.4	[36]
	算术平均值	ZMR	76.3	38.3	7.4	1.46	6.3	5.6	3.1	3.1
$\sigma_{n-1}$		19.4	4.3	1.3	0.07	1.0	0.4	0.3	0.2	

(表 3), 分别取  $\rho=0.1$  和  $0.9$ ,  $k=1$ , 计算获得的曲线绘于图 4。在该模式中  $D_{Ce}=1.14$ ,  $D_{Yb}=0.31$ 。当  $\rho=0.1$  时, 即岩浆的补给速率远小于结晶速率, REE 的分馏类似于单一的分馏结晶过程 (对比模型 1), HREE 在残余熔体中富集。当  $\rho=0.9$  时, 即岩浆补给速率与结晶速率相接



近, 晶出相和剩余熔体中 REE 含量呈现较复杂的变化。结晶作用初期 ( $F=0.9-0.7$ ), 熔体逐渐富集 HREE; 随后 ( $F=0.5-0.3$ ) HREE 开始亏损; 至最晚期的残余熔体 ( $F=0.1$ ), HREE 被强烈消耗, 呈现简单右倾斜、无 Eu 亏损的直线型式。如果在岩浆结晶过程中, 因受到构造挤压作用引起岩浆的涌动和上侵, 被中止演化的岩浆将保留富 HREE 特征。可以设想, 改变该模型中的各种参数 ( $D$ 、 $k$  和  $\rho$ ), 将得到千变万化的 REE 分馏过程。

### 2.3 叠加重熔模型

冯志文等<sup>[37]</sup>认为华南高度演化的成矿花岗岩是多次叠加重熔形成的。李献华等通过痕量元素及铅、锶同位素组成的对比, 认为诸广山复式岩体是加里东花岗岩基重熔再造的产物。邓志成<sup>[16]</sup>则主张大田富重稀土花岗岩是早期熔融后的残留物进一步遭受深熔作用的结果, 这类似于“*A*”型花岗岩的成因假设<sup>[38]</sup>。表 3 中的模型 6 至 8 用于检验上述几种可能性, 其中模型 6 和 7 的计算结果绘于图 5。

模型 6 以南岭二长花岗岩 (MGA) 作为先存源岩发生再次重熔, 采用实比批式熔融模型<sup>[1]</sup>, 当  $F \leq 0.1$  时, 可以得到两翼近水平的“海鸥”型 REE 型式; 而当  $F$  增大时, 熔体成分便逐渐趋近于源岩 (图 5 左)。

模型 7 以加里东期花岗岩 (CGA) 作为第一次深熔作用的源岩 ( $C_0^1(1)$ ), 其  $F=0.3$  时的熔融产物固结后作为第二次熔融的源岩 ( $C_0^1(2)$ ) (表 3, 4), 当  $F \leq 0.1$  时, 亦可得到类似的相对富 HREE 的型式 (图 5 右)。

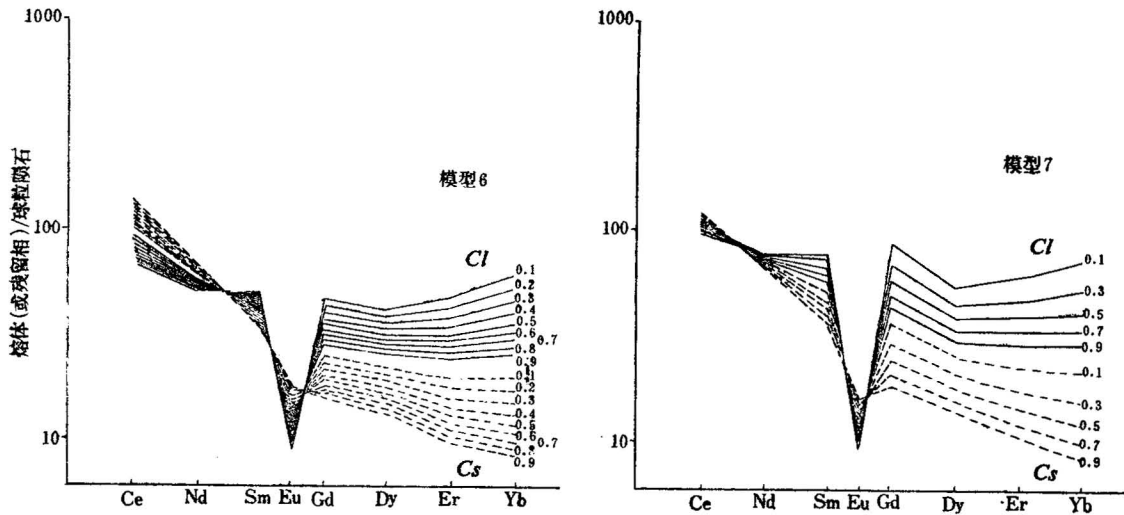


图 5 叠加重熔作用过程中 REE 分布型式的变化

Fig. 5 Variations of REE distribution patterns for remelting processes

模型 6 和 7 详见正文及表 3。实线: 熔体 (CI); 虚线: 结晶相 (Cs)

See text and Table 3 for Model 6 and 7. solid line: melt (CI); dashed line: crystallized phase (Cs)

模型 8 以震旦纪变质岩 (ZMR) 为初始源岩 ( $C_0^1(1)$ ), 其发生 30% 熔融后的残留物作为第二次深熔作用的源岩 ( $C_0^1(2)$ ), 它同样可以得到 HREE 相对抬升的曲线型式, 所不同的是由于原残留相相对富 Eu, 导致二次熔融产物 Eu 亏损减弱。

上述模型表明, 对于不同情况下的叠加重熔作用, 当  $F \leq 0.1$  时, 均可以得到 LREE/HREE 值接近于 1 的“海鸥”型 REE 分布型式, 然而要使 HREE 更进一步聚集, 则必须有分离结晶过程参予。

### 3 讨论和结论

运用现有的痕量元素模型和矿物/熔体分配系数, 可以通过各种岩浆过程模拟 HREE 的富集机制, 在这些过程中副矿物起着决定性的作用。因此, 控制副矿物晶出(或溶解)种类和顺序的局部物理化学环境(诸如源岩性质、岩浆成分及挥发分含量、围岩对岩浆的影响及其程度、温度、压力、 $f_{O_2}$ 、pH 等)便成为决定 REE 演化方向的关键制约因素。由高成熟度的地壳物质所派生的高度演化的花岗岩浆是 HREE 聚集的必要条件, 但不是充分必要条件。正如计算过程所表明的, 对于曲线向左倾斜的 HREE 富集形式(模型 1)和 REE 极度亏损的型式(模型 2 至 4), 分馏结晶作用是必不可少的, 而对于一般的富 HREE 型式, 则可能存在多种地质过程。这恰如微量元素间的协变关系是线性还是指数变化, 只能区分平衡还是分离过程, 而无法判别究竟是平衡结晶还是平衡熔融? 是分离结晶还是分离熔融<sup>[39]</sup>? 因此, REE 型式不能简单地作为鉴别岩石成因的标志<sup>[8]</sup>。

笔者认为, 单纯精确地模拟和再现某个复式岩体 REE 分布型式的演化过程并无实际价值, 由于目前缺少更精确的副矿物实验资料, 它使问题转变为纯数学意义的运算。我们更关心的是影响岩浆成分和 REE 演化趋向的因素, 以及这些因素对有关岩体中稀有金属富集和分带型的控制作用。这要求更深入细致的野外地质观察与更精确的实验岩石学资料的结合, 以及更为详尽的矿物学研究, 尤其是副矿物的种类、嵌布特征及其生成顺序和条件。无论如何, 富 HREE 型的花岗岩类可以作为寻找具有云英岩化蚀变的钨锡矿床的重要辅助指标<sup>[15]</sup>, 而 REE 极度亏损的钠长花岗岩则常与铋钼矿化有着密切的关系<sup>[11, 18-22]</sup>。这种差别究竟是由母岩浆决定的, 还是受岩浆演化链上出现的随机偶然变化控制? 目前尚难下定论, 但迄今获得的同位素资料不能证明它们在岩浆的起源上存在显著的差别。

感谢袁忠信和白鸽研究员对本项研究的悉心指导, 并感谢张西凡同志的热情帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Allegre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 38(1):1-25.
- 2 Hanson, G N. The application of trace elements to the petrogeneses of igneous rocks of granitic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 38(1):26-34.
- 3 Miller C F, Mittlefehdt D W. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas. *Geology*, 1982, 10: 129-133.
- 4 Cameron K L, Cameron M. Whole-rock/groundmass differentiation trends of REE in high-silica rhyolites. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1986, 50:759-769.
- 5 Micheal P. Partition coefficients for rare earth elements in mafic minerals of high silica rhyolites; The importance of accessory mineral inclusions. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1988, 52:275-282.
- 6 Montel J M., Experimental determination of solubility of Ce-monzonite in  $SiO_2-Al_2O_3-K_2O-Na_2O$  melts at 800 °C, 2 kilobars, under  $H_2O$ -saturated conditions. *Geology*, 1986, 14:659-662.
- 7 Ohlander B, Billstrom K, Halenius E. Behavior of rare-earth elements in highly evolved granitic systems; Evidence from Proterozoic molybdenum mineralized aplites and associated granites in northern Sweden. *Lithos*, 1989, 23:267-280.
- 8 吴澄宇, 白鸽, 黄典森, 朱正书. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义. *中国地质科学院院报*, 1992, 25: 43-58.
- 9 吴澄宇, 黄典森, 白鸽, 丁孝石. 南岭花岗岩类起源与稀土元素的分馏. *岩石矿物学杂志*, 1990, 9(2): 106-116.
- 10 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 徐士进. 从 Nd 模式年龄谈华南地壳的形成时间. *南京大学学报(地球科学版)*, 1989, (3): 82-91.

- 11 朱金初, 徐士进. 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, 1989, 8(3): 21—31.
- 12 毛景文, 宋叔和, 陈毓川. 桂北地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列. 北京科学技术出版社, 1988.
- 13 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征. 地质学报, 1988, 62(4): 327—344.
- 14 李亿斗, 盛继福, LeBel L, Giuliani G. 西华山花岗岩下陆壳起源的证据. 地质学报, 1986, 60(3): 256—272.
- 15 朱正书, 朱金初, 徐克勤. 银岩斑岩锡矿的地球化学及其成因研究. 地球化学, 1988, (4): 326—335.
- 16 邓志成. 赣南大田重稀土花岗岩的特征与成因. 桂林冶金地质学院学报, 1988, 8(1): 39—48.
- 17 马大铨, 赵子杰, 涂绍雄, 林惠坤, 张小豪. 广东阳春盆地花岗岩类的稀土元素地球化学. 南岭地质矿产文集, 第1辑. 北京: 地质出版社, 1985. 72—81页.
- 18 朱金初, 贾怀仁, 叶俊, 李振敏. 华南某些含锡花岗岩的稀土配分及其成岩意义. 南京大学学报, 地质学增刊. 1984, 总(4): 81—96.
- 19 陈德潜. 论香花岭花岗岩的成因与稀土元素地球化学特征. 矿床地质研究所所刊, 1987, (2): 61—74.
- 20 袁忠信, 白鸽, 余时美, 李双保, 郭永泉, 刘光海. 江西灵山花岗岩地质特征及其成岩成矿作用. 北京科学技术出版社, 1988.
- 21 Xia Hongyuan, Liang Shuyi. Evolution and REE geochemistry of Huangsha-Tieshanlong ore-bearing granite. Chinese Jour. Geochemistry, 1988, 7: 207—219.
- 22 孙恭安, 史明魁, 张宏良, 胡雄伟. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究. 南岭地质矿产科研报告集, 第2集. 中国地质大学出版社, 1989. 326—363页.
- 23 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 地质专报, 第10号. 北京: 地质出版社, 1989.
- 24 凌雯, 黎彤, 陈道公, 李峰, 顾靖飞. 用REE部分熔融模式探讨某些华南花岗岩体的成因. 中国科学, B辑, 1988, (3): 321—331.
- 25 Henderson P. Rare Earth Elements Geochemistry, Developments in Geochemistry 2, Elsevier.
- 26 刘姝群, 杨世义. 南岭某些与锡多金属矿床有关的花岗岩体的稀土元素地球化学及其成因. 矿床地质, 1987, 6(4): 11—22.
- 27 Plant J A, O'Brien C, Tarney J, Hurdley J. Geochemical criteria for the recognition of high heat production granites. In: High Heat Production (HHP) Granites, Chameleon Press Ltd., 1985, 263—285.
- 28 Arth J G, Hanson G N. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northeastern Minnesota. Geoch. Cosmoch. Acta, 1975, 39: 325—362.
- 29 中国科学院贵阳地球化学研究所. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1979.
- 30 黄舜华, 王中刚, 章钟嘏, 何松裕. 氟碳铈矿形成条件的实验研究. 矿物学报, 1986, 6(2): 155—160.
- 31 黄舜华, 王中刚, 章钟嘏, 何松裕. 黄钽矿形成条件的实验研究. 矿物学报, 1987, 7(3): 274—278.
- 32 朱振华. 结晶分异作用中微量元素的行为以及熔体和固相成分的相互关系. 地质论评, 1987, 33(6): 514—523.
- 33 Wetzel K, Remer M, Hirsch K. Minor element effects of combined fractional melting and crystallization. Earth Planet. Sci. Lett., 1989, 93: 142—150.
- 34 於崇文, 骆庭川, 鲍征宇, 胡云中. 南岭地区区域地球化学. 地质专报, 三、岩石矿物地球化学第7号, 北京: 地质出版社, 1987.
- 35 钱建平. 广东西部沉积岩的稀土元素地球化学. 桂林冶金地质学院学报, 1987, 7(4): 317—326.
- 36 胡云中, 邓坚, 袁宁, 何建平. 桂北地区地层及锡矿带地球化学. 北京科学技术出版社, 1990.
- 37 冯志文, 夏卫华, 章锦统, 陈紫英. 南岭含矿叠加-重熔型花岗岩稀土元素地球化学特征. 地球化学, 1989, (1): 43—51.
- 38 Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. Contrib. Mineral. Petrol., 1982, 80: 189—200.
- 39 Caskie D R M. Identification of petrogenetic processes using covariance plots of trace-element data. Chem. Geol., 1984, 42: 325—341.

## RARE EARTH ELEMENT MODELS OF HIGHLY EVOLVED GRANITIDS IN THE NANLING MOUNTAIN AREA

Wu Chengyu

*(Institute of Mineral Deposits, CAGS, Beijing)*

Zhu Zhengshu

*(Regional Metallogeneralization Section, CAGS, Beijing)*

### Abstract

Highly evolved granites are generally related to W, Sn, Nb-Ta and REE mineralization in the Nanling Mountain area. According to the REE distribution patterns, they can be divided into three categories: (1) normal, (2) HREE-enriched and (3) REE-depleted, and show fractional trends from earlier to later stages in multiphase intrusive complexes. Simulating calculations by using the available theoretical models reveal that several processes, such as batch partial melting, fractional crystallization and combined fractional partial melting and crystallization (Wetzel et al., 1989), might be responsible for the evolution of the magmas, during which accessory minerals, such as sphene, apatite, allanite, monazite, xenotime, zircon and garnet, play the most important role in REE fractionation. Such complex processes lead to the conclusion that one must be cautious when using REE distribution patterns as tracers for interpreting the genesis of granitic magmas.

**Key words:** REE simulation, highly evolved granites, the Nanling Mountain area

### 作者简介

吴澄宇，1957年7月出生。1982年在长春地质学院获学士学位，1984年在南京大学地球科学系获硕士学位，1988年在中国地质科学院获博士学位。现为中国地质科学院矿床地质研究所副研究员，从事矿床地质及地球化学方面的研究。通讯地址：北京西城百万庄路26号中国地质科学院矿床地质研究所。邮政编码：100037。