

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

花岗岩中不同成因类型包体的 稀土元素定量模型

沙 连 堃

(桂林冶金地质学院, 桂林)

本文尝试用数学定量的方法研究花岗岩中包体的成因, 通过推导得出了不同成因类型的包体的微量元素定量模型, 它们是: 残留体模型、析离体模型、同源捕虏体模型。用稀土元素对上述模型进行了检验, 其结果和岩石学、矿物学及地球化学的研究结果吻合。

花岗岩中包体的研究, 对探讨花岗质岩浆的形成过程、侵位定位机制, 花岗岩的成因, 源岩性质以及岩浆的流变学特征等方面能够提供极为重要的信息。因此, 近年来引起了越来越多的国内外花岗岩研究者的关注。包体的成因多种多样, 可归结为下列五种成因类型: (1) 源岩熔融过程的固相残留体; (2) 岩浆结晶过程中通过分异作用产生的析离体; (3) 外源捕虏体; (4) 同源捕虏体; (5) 不同成份的岩浆相互混合, 尤其是高温的基性岩浆注入低温的酸性岩浆的产物。对于这些不同成因类型的包体的判别准则, 许多研究者⁽¹⁻⁶⁾已在野外宏观地质、矿物学、岩石学、地球化学等方面做了不少很有意义的研究工作。本文尝试从定量方面研究花岗岩中包体的成因, 建立了不同成因类型包体的微量元素定量模型及其有效的定量判别准则, 并应用这些模型来判别广西大宁花岗闪长岩体中暗色微粒包体的成因。

一、不同成因类型包体的定量模型的推导

(一) 残留体模型

所谓残留体是指源岩熔融过程中未熔融的固相。根据熔融的机制不同, 可以分出两种残留体: 平衡熔融的残留体及分馏熔融的残留体, 两者的模型不同。

1. 平衡熔融的残留体模型

平衡熔融过程的方程为^[7]:

$$\frac{C_l}{C_0} = \frac{1}{D + (1-D)F} \quad (1)$$

其中 C_l 指熔融作用产生的熔浆中元素的浓度, C_0 指源岩中元素的初始浓度, D 代表元素在岩浆中的固相和液相间的总分配系数。 F 指岩浆中固液两相的比例。对元素 p 、 q 分别有:

$$\frac{C_l^p}{C_0^p} = \frac{1}{D^p + (1-D^p)F}; \quad \frac{C_l^q}{C_0^q} = \frac{1}{D^q + (1-D^q)F}$$

两式联立, 消去 F , 并将 $C_i^p = \frac{C_p^p}{D^p}$ 及 $C_i^q = \frac{C_q^q}{D^q}$ 代入后, 整理得:

$$\frac{1}{C_i^q} = \frac{C_0^p D^p (1 - D^q)}{C_0^q D^q (1 - D^p)} \cdot \frac{1}{C_i^p} + \frac{D^q - D^p}{C_0^q D^q (1 - D^p)} \quad (2)$$

其中 C_i^p 和 C_i^q 分别指固相残留体中元素 p 及 q 的浓度。令 $K = \frac{C_0^p D^p (1 - D^q)}{C_0^q D^q (1 - D^p)}$ $b = \frac{D^q - D^p}{C_0^q D^q (1 - D^p)}$ 则方程 (2) 变为:

$$\frac{1}{C_i^q} = K \cdot \frac{1}{C_i^p} + b \quad (3)$$

式 (2) 或 (3) 即为平衡熔融的残留体模型, 它说明如果花岗岩中的包体是平衡熔融过程的残留体, 则包体中两种微量元素浓度的倒数值间成直线关系。直线方程的斜率 K 及截距 b 可以通过作图或线性回归方法求得, 而不必知源岩中元素 p 及 q 的初始浓度 C_0^p 及 C_0^q 或总分配系数 D^p 及 D^q 。

2. 分馏熔融的残留体模型

在分馏熔融过程中, 熔体一产生即与固相的残留体分离, 这种机制在强烈的构造活动带中发生是可能的。分馏熔融过程的方程为^[7]:

$$\frac{C_i}{C_0} = \frac{1}{D} (1 - F)^{\left(\frac{1}{D} - 1\right)} \quad (4)$$

其中 C_i 指分馏熔融产生的熔浆中任一微量元素的浓度, C_0 指源岩中元素的初始浓度。按方程中所含元素的种数不同, 分为两元素法, 三元素法及四元素法。由方程 (4) 推导出两元素、三元素、四元素分馏熔融的残留体模型分别为: 两元素法:

$$\log C_i^p = K \cdot \log C_i^q + b \quad (5)$$

其中 $K = \frac{D^q (1 - D^p)}{D^p (1 - D^q)}, b = \log \left[\frac{C_0^p}{(C_0^q)^{\frac{D^q (1 - D^p)}{D^p (1 - D^q)}}} \right]$

三元素法: $\log \frac{C_i^p}{C_i^q} = K \cdot \log C_i^r + b \quad (6)$

其中 $K = \frac{D^r (D^q - D^p)}{D^p D^q (1 - D^r)}, b = \log \left[\frac{C_0^p}{C_0^q (C_0^r)^{\frac{D^r (D^q - D^p)}{D^p D^q (1 - D^r)}}} \right]$

四元素法: $\log \frac{C_i^p}{C_i^q} = K \cdot \log \frac{C_i^r}{C_i^t} + b \quad (7)$

其中 $K = \frac{D^r D^t (D^q - D^p)}{D^p D^q (D^r - D^t)}, b = \log \left[\frac{C_0^p}{C_0^q} \cdot \left(\frac{C_0^r}{C_0^t} \right)^{\frac{D^r D^t (D^q - D^p)}{D^p D^q (D^r - D^t)}} \right]$

式中 C_i^p 、 C_i^q 、 C_i^r 和 C_i^t 分别指元素 p 、 q 、 r 、 t 在固相残留体中的浓度。方程 (5)、(6)、(7) 说明, 如果花岗岩中包体为分馏熔融过程的固相残留体, 那么包体中两种微量元素浓度的对数值或两个微量元素浓度比值的对数与另一元素的浓度的对数值或两个微量元素浓度比值的对数值与另两个元素的浓度比值的对数间呈直线关系。

(二) 析离体模型

据形成析离体的岩浆结晶过程的特点不同, 分为下面两种模型。

1. 分馏结晶作用形成的析离体模型

分馏结晶作用的基本方程为⁽⁷⁾:

$$C_i = C_0 F^{D-1} \quad (8)$$

其中 C_i 指正在结晶的岩浆液相中任一微量元素的浓度, C_0 是指元素在岩浆液相中的初始浓度。按方程中所含元素的种数不同, 也分为两元素法、三元素法及四元素法。由方程(8)推导的分馏结晶作用形成的析离体的两元素、三元素及四元素模型形式分别与分馏熔融的残留体模型相同, 只是直线方程的斜率和截距不同。如两元素法:

$$\log C_i^q = K \cdot \log C_i^p + b \quad (9)$$

其中

$$K = \frac{D^q - 1}{D^p - 1} \quad b = \log \left[C_0^q D^q (C_0^p D^p)^{\frac{D^q - 1}{D^p - 1}} \right]$$

2. 平衡结晶作用形成的析离体模型

由于平衡结晶作用和平衡熔融过程的方程形式相同, 都为方程(1), 所以平衡结晶作用形成的析离体的模型方程和式(2)相同, 即:

$$\frac{1}{C_i^q} = \frac{C_0^p D^p (1 - D^q)}{C_0^q D^q (1 - D^p)} \cdot \frac{1}{C_i^p} + \frac{D^q - D^p}{C_0^q D^q (1 - D^p)} \quad (10)$$

虽然方程(2)和方程(10)形式相同, 但公式中各符号代表的意义不同: 在方程(2)中, C_i^p 和 C_i^q 分别代表熔融的固相残留体中微量元素 p 及 q 的浓度, 而在方程(10)中指岩浆结晶分异作用产生的固相析离体中微量元素 p , q 的浓度; 在方程(2)中, C_0^p 及 C_0^q 分别指熔融的源岩中元素的初始浓度, 而在方程(10)中指岩浆未结晶时, 元素 p 及 q 的初始浓度。

$$\text{方程(10)两边同乘以 } C_i^p, \text{ 并令 } K = \frac{D^q - D^p}{C_0^q D^q (1 - D^p)} \quad b = \frac{C_0^p D^p (1 - D^q)}{C_0^q D^q (1 - D^p)}$$

则方程变为:

$$\frac{C_i^p}{C_i^q} = K \cdot C_i^p + b \quad (11)$$

方程(11)说明, 在平衡结晶或平衡熔融过程中, 两个微量元素浓度的比值和这种比值中分子项的元素的浓度值间呈直线关系。方程(11)解释了在地质上为什么可以用La/Sm-La之间的直线关系来鉴定平衡过程, 更重要的是, 它告诉我们同样可以用其它微量元素来作为判别平衡过程的标志。

区别平衡结晶的析离体和平衡熔融的残留体的方法如下: 选取几个包体及周围花岗岩的样品, 分别测定样品中选定的两种微量元素的含量值。如果是平衡结晶的析离体, 则无论对任何两对微量元素, 包体的样品和花岗岩的样品都位于同一条直线上; 而平衡熔融的残留体的样品和包含它们的主体花岗岩的样品一般不在一条直线上。

(三) 同源捕虏体模型

同源捕虏体在这里仅限于指通过下面机制形成的包体: 当定位以后的岩浆结晶时, 岩浆体边缘的部分冷凝速度相对较快而首先固化, 而岩浆体内部中央部分还处于液相状态。在构造活动或其它作用影响下, 岩体内部的残余岩浆向岩体边部已固化的部分侵入, 破碎并捕虏固化部分的岩

石, 形成同源捕虏体。按经历的过程不同分为下面两个模型。

1. 两阶段分馏结晶的同源捕虏体模型

在第一阶段中, 岩体边缘的固相是通过分馏结晶完成的。对两个元素 p 和 q , 由方程 (9) 得:

$$\log C_{f,1}^p = \frac{D_1^q - 1}{D_1^p - 1} \log C_{f,1}^q + \log \left[C_{0,1}^q D_1^q (C_{0,1}^p D_1^p)^{-\frac{D_1^q - 1}{D_1^p - 1}} \right] \quad (12)$$

同理, 第二阶段的岩浆结晶方程为:

$$\log C_{f,2}^p = \frac{D_2^q - 1}{D_2^p - 1} \log C_{f,2}^q + \log \left[C_{0,2}^q D_2^q (C_{0,2}^p D_2^p)^{-\frac{D_2^q - 1}{D_2^p - 1}} \right] \quad (13)$$

其中 $C_{0,2}^p$ 和 $C_{0,2}^q$ 为第二阶段岩浆的初始浓度, 实际上为第一阶段残余岩浆的浓度。

2. 平衡结晶一分馏结晶两阶段同源捕虏体模型

第一阶段为平衡结晶过程, 对两个元素 p 和 q , 由方程 (2) 得:

$$\frac{1}{C_{f,1}^p} = \frac{C_{0,1}^p D_1^p (1 - D_1^q)}{C_{0,1}^q D_1^q (1 - D_1^p)} \cdot \frac{1}{C_{f,1}^p} + \frac{D_1^q - D_1^p}{C_{0,1}^q D_1^q (1 - D_1^p)} \quad (14)$$

第二阶段为分馏结晶过程, 由方程 (8) 得:

$$\frac{1}{C_{f,2}^p} = \frac{(C_{0,2}^p D_2^q)^{\frac{D_2^q - 1}{D_2^p - 1}}}{C_{0,2}^q D_2^q} \cdot (C_{f,2}^q)^{-\frac{D_2^q - 1}{D_2^p - 1}} \quad (15)$$

上面导出的花岗岩中不同成因类型的包体的定量模型的表达式具有下面三个共同的特点:

(1) 不论包体属于何种成因, 其模型方程都是直线, 其斜率 K 及截距 b 可以通过作图或线性回归方法求得; (2) 由于直线方程的特点, 在用模型方程判别包体的成因时, 不必知道原方程中的未知参数, 如元素的初始浓度、元素的总分配系数以及岩浆中固液两相的比例。这个特点很重要, 因为以前的方程中如果不知道这些参数, 计算和判别岩浆过程的类型是不可能的, 而且这些参数难以求得并随所研究的岩体的不同而变化。因此, 迄今为止, 这方面的研究工作几乎全部是依据一定的实验数据而假定这些参数; (3) 在包体成因的模型方程中, 元素的总分配系数 D 以比值的形式出现。

二、包体成因的定量模型的应用实例

大宁岩体位于广西贺县与广东连山县交界一带, 呈北西—南东向展布, 长 60km, 宽 5—15 km, 出露面积约 560km²。岩体为加里东期花岗岩, 侵入寒武纪浅变质砂页岩中, 接触热变质明显; 中泥盆统桂头组沉积覆盖在岩体之上; 全岩 Rb—Sr 等时线年龄为 431Ma¹⁾。岩性主要为粗粒似斑状花岗闪长岩, 局部为石英二长岩和二长花岗岩。岩体在成因类型上属于 I 型, 与金、银、铅和锌矿化关系密切。

暗色微粒包体在整个岩体中都有分布, 但向岩体中心密度增加。包体的大小从 1×1.5cm²—2×1.5m²不等, 一般介于 10×15—20×40cm², 形状多见椭球状, 部分包体棱角明显。斑状结构, 基质具微粒结构, 局部重结晶为粗粒; 斑晶为中长石、角闪石及黑云母; 基质由微晶的钠长石、黑云母和角闪石组成。矿物组成: 斜长石含量 50—55%, 黑云母 35—40%, 角闪石 10—5%,

1) 由有色工业总公司桂林矿产地质研究院同位素室测定。

未受花岗岩浆同化的暗色微粒包体一般无钾长石和石英。副矿物有锆石、褐帘石、榍石、磁铁矿及针状磷灰石。化学组成上, SiO_2 变化于 50.49—57.11(wt. %), 平均 53.83; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 变化于 6.53—9.30(wt. %), 平均 8.06; Fe_2O_3 含量低, 变化于 1.19—2.11(wt. %), 平均 1.65; P_2O_5 含量高, 变化于 0.2—0.42(wt. %)。

野外宏观地质、岩石学、矿物学以及地球化学的研究结果表明: 大宁花岗闪长岩中的暗色微粒包体是异源的火成岩的捕虏体。其主要依据如下: (1) 包体在整个岩体中都有分布, 但主要分布在岩体中部; (2) 包体和周围花岗岩界限截然分明, 棱角状的暗色微粒包体常见 (图 1); (3) 包体具斑状结构, 斑晶为斜长石、黑云母和角闪石, 斑晶斜长石中见到聚核作用 (Synneusis) 形成的斜长石双晶 (图 2), 这种双晶只有在岩浆中才能形成。斜长石斑晶中广泛发育有环带结构 (图 3)。所有这些都为岩浆岩的特征; (4) 包体斑状结构的基质为微粒结构, 并能见到大量的针状磷灰石。这是岩浆快速冷凝固结晶的结构特征; (5) 暗色微粒包体中的副矿物自形, 无磨

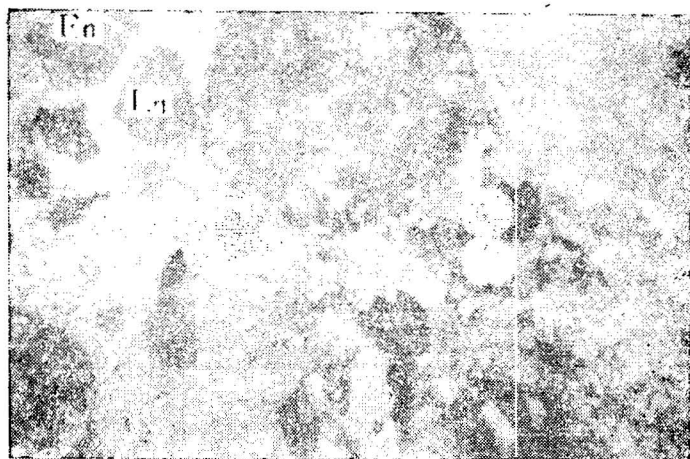


图 1 棱角状的暗色微粒包体 (En)

Fig. 1 Angular dark-coloured microgranular enclaves (En)



图 2 暗色微粒包体中具聚核作用形成的双晶的斜长石斑晶

Fig. 2 Twined plagioclase phenocryst formed by nucleation in dark-coloured microgranular enclave

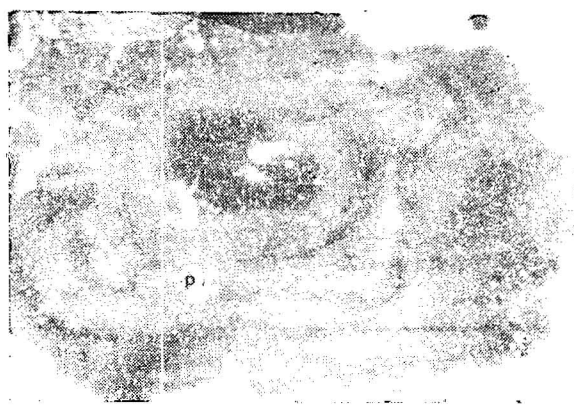


图 3 暗色微粒包体中具环带结构的斜长石斑晶 $\times 50 (+)$

Fig. 3 Zoned plagioclase phenocryst in dark-coloured microgranular enclave $\times 50 (+)$

双晶的两个部分分别具有各自独立的环带结构。 $\times 50 (+)$

Two parts of the twin have their own zoned structures. $\times 50 (+)$

圆现象；(6)对包体中42个斜长石双晶类型的测定结果表明：A双晶（指可通过应力产生的机械双晶）出现的频率低，这是岩浆成因的斜长石的双晶特征；而C双晶（除A双晶以外的生长双晶）出现的频率极高。C双晶只能通过岩浆结晶过程中产生，是原生的生长双晶，这说明包体不是残留体；(7)包体中亲石元素Li(44.13ppm)，Be(2.1ppm)，F(1200ppm)，Rb(246.89ppm)，Cs(26.40ppm)，Sr(346.69ppm)，Ba(897.70ppm)含量高，而难熔元素Co(14.48ppm)，Ni(11.80ppm)，Cr(76.60ppm)，V(54.00ppm)含量低，说明包体非残留体，否则应出现相反的情况；(8)包体中稀土元素的含量远远高于页岩、砂岩中稀土元素的含量，说明包体不是围岩——浅变质砂页岩的捕虏体；同时与主体花岗闪长岩中稀土元素的含量差别也较大，尤其是中和重稀土元素，所以包体也不是同源捕虏体成因。

稀土元素(REE)的性质相似，在变质作用及蚀变作用中活动性不明显，在岩浆作用中尤其是轻稀土元素(La—Sm)有相当显著的分馏性，稀土元素内部各个元素间性质递变。所有这些使得稀土元素为包体成因定量模型研究中最理想的微量元素。

对采自横穿岩体剖面的标本进行显微镜下系统鉴定之后，选出了11个新鲜的，未受到同化混染的样品，其中包体有七个样，花岗闪长岩有四个样。样品由湖北地质局中心实验室用电感耦合等离子发射光谱法测定，各元素检出限为：Lu、Yb、Eu、Y $<0.01 \times 10^{-6}$ ；Ho、Dy、Tm、Er、La、Gd、Tb $=0.01 \sim 0.05 \times 10^{-6}$ ；Sm、Nd、Pr、Ce $=0.05 \sim 0.10 \times 10^{-6}$ ，测定结果如表1。

表 1 大宁花岗闪长岩及其中暗色微粒包体样品的稀土元素丰度值(ppm)

Table 1 Rare earth element abundances in the samples taken from
Daning Granodiorites and dark-coloured microgranular enclaves

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
53	暗色微粒包体	13.56	36.63	5.83	26.94	6.62	0.82	6.63	1.19	6.71	1.45	4.27	0.68	4.19	0.62	38.98
753		49.67	116.42	15.59	60.08	11.50	2.07	8.81	1.72	8.79	1.83	5.32	0.89	5.27	0.80	50.23
A ₂₃		77.21	135.52	16.79	60.93	10.80	1.78	8.10	1.31	6.97	1.41	4.05	0.66	4.39	0.60	38.39
B ₃		81.75	166.86	19.44	62.42	10.28	1.38	7.92	1.45	6.93	1.43	3.95	0.67	3.81	0.60	38.39
C		70.90	159.65	20.04	68.95	12.13	2.08	8.88	1.62	7.85	1.68	4.74	0.80	5.07	0.79	45.09
D		46.68	103.79	13.41	49.48	9.96	1.76	8.17	1.52	7.83	1.64	4.51	0.73	4.28	0.67	42.73
243	重结晶的暗色微粒包体	38.36	92.97	13.97	61.47	13.55	2.07	11.30	1.94	10.75	2.27	6.58	1.01	2.76	0.97	65.46
55	花岗闪长岩	56.17	100.60	12.56	44.78	7.91	1.20	5.84	0.97	5.27	1.09	3.15	0.51	3.38	0.46	31.63
A ₂₅		52.90	93.00	11.62	41.88	7.15	1.22	5.64	0.96	5.07	1.06	2.98	0.49	3.21	0.47	30.49
B ₅		40.07	79.87	10.10	32.89	6.60	1.19	5.42	0.92	5.31	1.04	3.04	0.49	4.10	0.48	26.61
753		45.96	87.74	10.86	33.68	6.44	1.23	5.24	0.89	5.02	1.10	2.82	0.48	2.77	0.43	24.62

据上述模型方程，编制了相应的BASIC程序，包括计算、模型识别、绘图、打印等功能。计算和绘图在IBM-PC-XT型微型机及其联结的CR-6002绘图机上完成。通过用计算机对定量模型的计算，回归，识别和绘图，对大宁花岗闪长岩体中暗色微粒包体的成因进行了判别，结果如下：

图4-a, b, c, d, e, f, g, h为稀土两元素、三元素、四元素的对数图，从中可以看出，七个暗色微粒包体的样品呈很好的直线关系，说明包体是通过分馏过程形成的。由于包体的样品和花岗闪长岩的样品分别位于不同的直线上，因此，大宁岩体中的暗色微粒包体不是大宁花岗闪长

岩浆分馏结晶过程的析离体, 或分馏结晶作用形成的同源捕虏体, 否则, 包体和包含它们的花岗闪长岩的样品在对数坐标图上, 应该处在同一条模型线上。从上面的讨论可以看出, 从定量模型判别得出的结论和前文讨论过有关包体成因的地质证据吻合很好, 两者相互验证。但是, 包体究竟是分馏熔融的残留体还是通过分馏结晶固化后的另外一种火成岩, 在大宁花岗闪长岩浆上升侵位过程中破碎并捕获作为异源的火成岩碎块, 下面讨论其区别方法。

在分馏结晶和分馏熔融两种过程中, 元素间遵守的规律相似, 如两元素法, 三元素法, 四元素法模型方程形式相同, 但它们的直线方程的斜率不同。两种过程的区别方法如下:

1. 两元素模型方程的斜率法: 由方程 (9) 得分馏结晶方程的斜率 $K_c = \frac{D^q - 1}{D^p - 1}$, 由方程

(5) 得分馏熔融模型方程斜率为 $K_m = \frac{D^p(1 - D^q)}{D^q(1 - D^p)}$

设 $D^q \gg 1$ 且 $D^p \gg 1$, 则 $K_c = \frac{D^q}{D^p}$, $K_m \approx 1$ 。通过对包体及花岗闪长岩单矿物及全岩稀土元素含量, 分配系数比较和计算后知, 在暗色微粒包体中, 轻稀土元素的总分配系数 $D^{LREE} \gg 1$, 而中和重稀土元素从 Gd 到 Y 总分配系数从大于 1 而逐渐趋向 1。

因为 $D^{La} \gg D^{Ce} \gg D^{Pr} \gg D^{Nd} \gg D^{Sm} \gg 1$, 可以预料: 对分馏结晶过程, 如果选择两个相邻的轻稀土元素作图, 则回归直线方程的斜率具有下面两个特点:

$$\textcircled{1} K_c = \left(\frac{D^{La}}{D^{Ce}}, \frac{D^{La}}{D^{Pr}}, \frac{D^{La}}{D^{Nd}}, \frac{D^{La}}{D^{Sm}} \right) \text{ 或 } \left(\frac{D^{Ce}}{D^{Pr}}, \frac{D^{Ce}}{D^{Nd}}, \frac{D^{Ce}}{D^{Sm}} \right) \text{ 或 } \left(\frac{D^{Pr}}{D^{Nd}}, \frac{D^{Pr}}{D^{Sm}} \right)。$$

K_c 值在以上三组内部从左向右增加; ②斜率 K_c 随 p 、 q 两元素的种类的不同而变化。而对分馏熔融过程, 模型直线方程的斜率恒等于常数 1。对暗色微粒包体的样品, 由计算机回归的自然对数直线方程如下:

回归直线方程	相关系数
$\ln C^{La} = 1.1917 \ln C^{Ce} - 1.6966$	0.9885
$\ln C^{La} = 1.4425 \ln C^{Pr} + 0.0412$	0.9720
$\ln C^{La} = 1.7667 \ln C^{Nd} - 3.1738$	0.9109
$\ln C^{La} = 1.9503 \ln C^{Sm} - 0.7181$	0.9068
$\ln C^{Ce} = 1.2222 \ln C^{Pr} + 1.4270$	0.9929
$\ln C^{Ce} = 1.5123 \ln C^{Nd} - 1.3631$	0.9401
$\ln C^{Ce} = 1.7289 \ln C^{Sm} + 0.6043$	0.8554
$\ln C^{Pr} = 1.2716 \ln C^{Nd} - 2.4194$	0.9731
$\ln C^{Pr} = 1.5348 \ln C^{Sm} - 0.9553$	0.8254

从上面的回归方程可以看出: 方程斜率按分馏结晶所预测的规律变化, 因此, 暗色微粒包体是通过分馏结晶作用形成的异源火成岩捕虏体, 而不是分馏熔融的残留体。

2. 四元素模型方程的斜率法: 据方程 (7) 得四元素分馏熔融的模型方程斜率 $K_m = \frac{D^r D^r (D^q - D^p)}{D^p D^q (D^r - D^r)}$; 据方程 (8) 推导得分馏结晶模型方程的斜率 $K_c = \frac{D^p - D^q}{D^r - D^r}$ 。

设 $D^p \gg D^q$ 且 $D^r \gg D^r$, 则 $K_m = \frac{D^r}{D^q}$, $K_c = \frac{D^p}{D^r}$, 其中 p , r 类元素对稀土元素来说为轻稀土

元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm; q 和 t 类元素对稀土元素来说为中和重稀土元素 Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y。在 D 满足上述条件时, 对分馏结晶作用, 只要 p 和 r 类元素不变, 不论 q

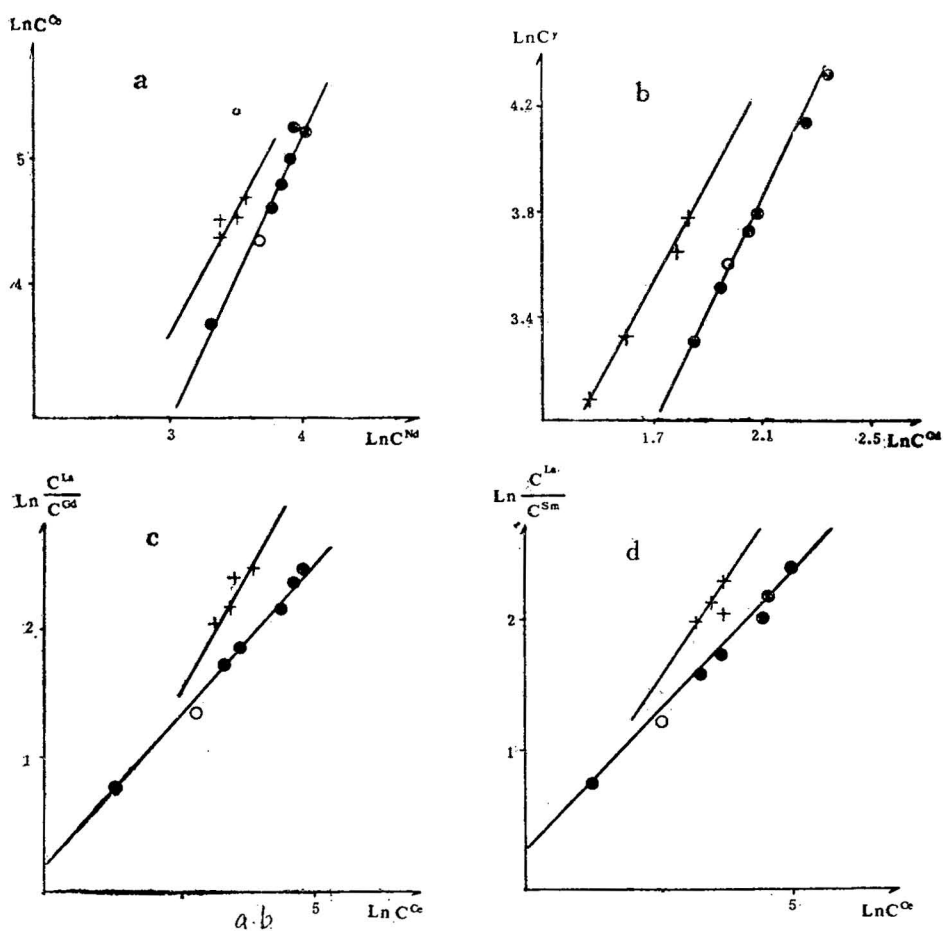


图 4 包体成因的稀土

Fig. 4 Diagrams of the quantitative models of rare earth elements used to

● 暗色微粒包体; ○ 重结晶的暗色微粒包体; + 花岗闪长岩

和 t 类元素怎样变化, K_c 的值不变; 而分馏熔融过程则相反, 在 D 满足上述条件时, K_m 与 p 、 r 类元素变化无关, 而随 t 、 q 类元素的不同而变化。

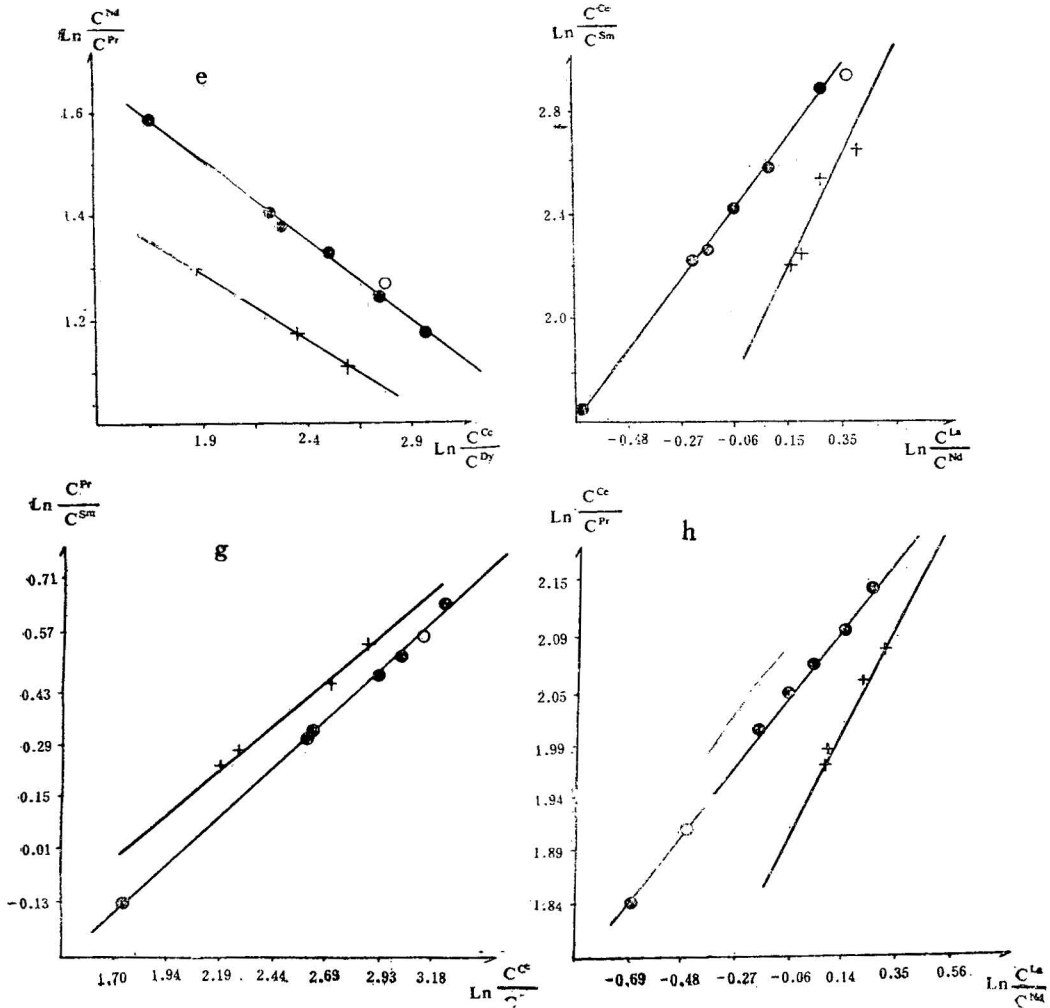
暗色微粒包体样品的计算机回归的自然对数四元素直线方程如下, 其中 $p=Sm, q=Yb, r=La, t=Dy, Ho, Er, Tm, Y, Lu, Gd, Tb$,

$$Ln \frac{C^{Sm}}{C^{Yb}} = 0.30 Ln \frac{C^{La}}{C^{Dy}} + 0.250$$

$$Ln \frac{C^{Sm}}{C^{Yb}} = 0.30 Ln \frac{C^{La}}{C^{Ho}} - 0.225$$

$$Ln \frac{C^{Sm}}{C^{Yb}} = 0.30 Ln \frac{C^{La}}{C^{Er}} - 0.180$$

$$Ln \frac{C^{Sm}}{C^{Yb}} = 0.30 Ln \frac{C^{La}}{C^{Tm}} - 0.570$$



元素定量模型鉴别图

determine the origins of enclaves in granites

● dark-coloured microgranular enclaves; ○ recrystallized dark-coloured microgranular enclave; + granodiorite

$$\ln \frac{C_{Yb}^{Sm}}{C_{Yb}^{Pr}} = 0.30 \ln \frac{C_{Yb}^{La}}{C_{Yb}^{Nd}} + 0.775$$

$$\ln \frac{C_{Yb}^{Lm}}{C_{Yb}^{Pr}} = 0.30 \ln \frac{C_{Yb}^{La}}{C_{Yb}^{Nd}} - 0.465$$

$$\ln \frac{C_{Yb}^{Sm}}{C_{Yb}^{Pr}} = 0.30 \ln \frac{C_{Yb}^{La}}{C_{Yb}^{Nd}} + 0.170$$

$$\ln \frac{C_{Yb}^{Sm}}{C_{Yb}^{Pr}} = 0.30 \ln \frac{C_{Yb}^{La}}{C_{Yb}^{Nd}} + 0.385$$

从上面的八个方程可以看出，在Sm, Yb, La元素类型固定不变时， $K=0.30$ 不变，不随t类元素Dy、Ho、Er、Tm、Y、Lu、Gd、Tb的类型不同而变化。因此，暗色微粒包体为通过分结作用形成的，而不是分馏熔融的残留体，这和两元素法判别的结果一致。

从上文可以看出,包体成因的定量模型对包体成因的判别结果和已观察到的地质证据完全吻合。

包体成因的定量模型的研究过程,可以归结为一逻辑程序图(图5)。在用计算机从定量方面判别花岗岩中包体成因时,可用此逻辑顺序图进行模式识别。图中菱形框表示某种判断,箭头表示大宁花岗闪长岩中暗色微粒包体的成因研究过程的逻辑顺序的实例。

由于本文是国内外首次对花岗岩中包体的研究从定量方面进行的尝试,可能有不足之处,敬请批评指正。

本文是在袁奎荣教授指导下完成的,杨心宜副研究员,阮道源教授,陈惜华副教授审阅了初稿。La Trobe大学A. J. R. White教授、法国Clermont II大学J. Didier教授给予了热情的鼓励,在此一并致谢。

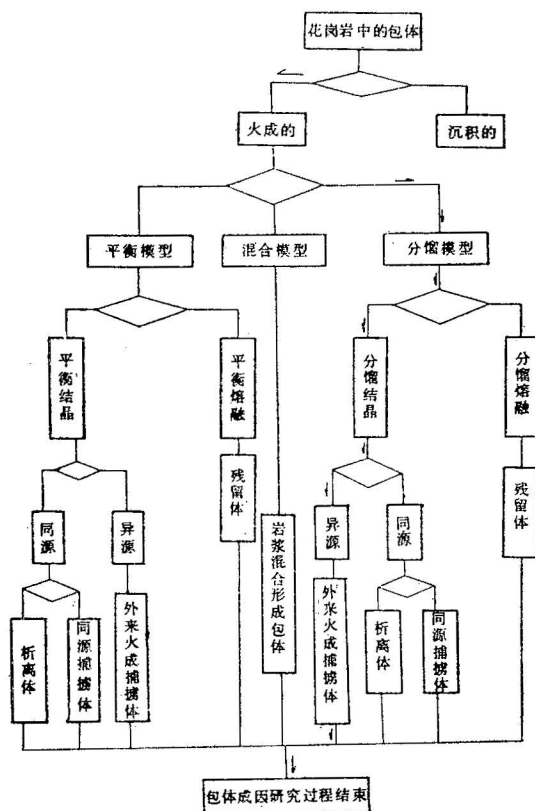


图 5 包体成因的定量模型研究逻辑程序图

Fig. 5 A logic program for the study of the quantitative models of the genetically different enclaves in granites

参 考 文 献

- [1] Didier, J., 1973, *Granites and Their Enclaves*. Elsevier, Amsterdam.
- [2] Cantegrel, J. M., Didier, J. and Gourgau, A., 1984, Magma mixing: origin of the intermediate rocks and enclaves from volcanism to plutonism. *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 35, pp. 63-76.
- [3] White, A. J. R. and Chappell B. W., 1977, Ultrametamorphism and the origin of granitoids. *Tectonophysics*, Vol. 43, pp. 7-22.
- [4] Vernon, R. H., 1984, Microgranular enclaves in granites: globules of hybrid magma quenched in plutonic environment. *Nature*, Vol. 309, No. 5967, pp. 348-349.

- [5] Ayrton, S., 1987, The zonation of granitic plutons, the failed Ring-dyke Hypothesis, *International Symposium on the Petrogenesis and Mineralisation of Granitoids*, pp. 1-3.
- [6] Sha Liankun, 1987, Tectonic types and geological settings of Mesozoic granites in South China and microplate hypothesis. *International Symposium on the Petrogenesis and Mineralisation of Granitoids*, pp. 258-259.
- [7] Henderson, P., 1984, *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, Amsterdam.
- [8] Hyndman, D. W., Mafic magmas and generation of granitoid batholiths; the Idaho Batholith, Idaho and Montana, USA, *International Symposium on the Petrogenesis and Mineralisation of Granitoids*, pp. 108-109.
- [9] Gromet, L. P. and Silver, L. T., 1983, Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implication. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 147, pp. 915-936.
- [10] Hathout, M. H., 1984, Rare earth elements in some Egyptian metavolcanics. *Chemical Geology*, Vol. 43, pp. 233-239.
- [11] Herrmann, A. G., Potts, M. J. and Snake, D., 1974, Geochemistry of the rare earth elements in spilites from the oceanic and continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 44, pp. 1-16.
- [12] Menzies, M., Blanchard, D. and Jacobs, J., 1977, Rare earth and other trace element geochemistry of metabasalts from the Pointsal ophiolite, California, *Earth Planet. Sci. Letter*, Vol. 37, pp. 203-215.
- [13] Piper, D. Z., 1974, Rare earth elements in sedimentary cycle; A summary. *Chemical Geology*, Vol. 14, pp. 285-304.

THE QUANTITATIVE MODELS OF RARE EARTH ELEMENTS OF THE GENETICALLY DIFFERENT TYPES OF ENCLAVES IN GRANITES

Sha Liankun

(Department of geology, Guilin College of Geology, Guilin, Guangxi)

Abstract

So far, researches on the geneses of the enclaves in granites have been mainly limited to the qualitative descriptions such as the macroscopic features in the field, mineralogy, and petrology of enclaves.

An attempt is first made to study the geneses of the enclaves in granites by use of the quantitative models of trace elements and particularly rare earth elements (REE). Through some deductions, the author has obtained the quantitative models of trace elements for the genetically different enclaves in granites. These models are: the models of relicts formed in melting, the models of schlierens, and the models of autoliths.

All the equations of the above models are linear, and it is not necessary to suppose or measure the unknown parameters such as the total distribution coefficients and initial concentrations of the trace elements as well as the proportions of the solid phase and liquid phase in the magma when determining quantitatively the geneses of the enclaves in the granites.

The above models have been applied to the studies of the origin of the dark-coloured microgranular enclaves in the Daning Granodioritic Batholith, Hexian County, Guangxi, by use of rare earth elements, and proved to be effective. The results are coincident with geological and geochemical evidence.