

非实比熔融中 P 值对熔融产物影响的讨论

许继锋 张本仁

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

主题词 非实比熔融 P 值 地幔源岩

提 要 非实比部分熔融模型中 P 值的大小取决于熔融模式, 不同的 P 值会造成熔体成分的改变。当 P 值不同时, 相容元素和弱不相容元素在熔体中的浓度出现大的变化, 因此, 在模型中这些元素的 P 值不能用 D_0 代替; 然而, P 值的变化仅造成强不相容及中等不相容元素的浓度小的变化, 可以认为强不相容与中等不相容元素的 P 值约等于 D_0 。在部分熔融程度相同的条件下, 不同的 P 值可以使同种源岩熔出稀土元素模式亏损或富集的不同岩浆类型。

自然界地幔的部分熔融过程存在着不同的方式与作用, 如实比熔融与非实比熔融^[1,2]。然而, 目前对部分熔融岩浆作用地球化学问题的讨论, 一般只考虑实比熔融过程。本文主要讨论非实比熔融作用在自然界的普遍存在, 以及在地幔部分熔融过程中 P 值对熔融产物的影响。

1 问题的提出

对一个批式部分熔融模型^[1]:

$$\frac{C^i}{C_0} = \frac{1}{D^i + F(1 - P^i)} \quad (1)$$

P 值是指进入熔体那部分固相与原固相间的总分配系数:

$$P^i = X_\alpha K_\alpha^i + X_\beta K_\beta^i + X_\gamma K_\gamma^i + \cdots + X_\nu K_\nu^i \quad (2)$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma, \cdots, \nu$ 为进入熔体中矿物相; $X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, \cdots, X_\nu$ 为进入熔体中矿物相的质量百分数, $X_\alpha + X_\beta + X_\gamma + \cdots + X_\nu = 1$; K_α^i 是元素 i 在矿物相 α 与熔体间的分配系数。因此, P 值应是熔融模式(melting mode)的函数, 熔融模式是指进入熔体中矿物相之间的相对比例数。当 $D_0^i = P^i$ 时, 为实比熔融, 它在熔融过程中源岩矿物相的质量百分数始终不变, 等于源岩中矿物相的质量百分数; 当 $P^i \neq D_0^i$ 时, 则为非实比熔融, 它在熔融过程中矿物相比例会发生变化^[2]。 P 值与原始固相总分配系数(D_0^i)与残余固相总分配系数(D_{rs}^i)之间的关系为^[2]:

$$P^i = \frac{D_0^i - (1 - F)D_{rs}^i}{F} \quad (3)$$

实比熔融过程 $P^i = D_{rs}^i = D_0^i$, 而非实比熔融过程中, $P^i \neq D_{rs}^i \neq D_0^i$ ^[2]。

在讨论自然界的岩浆作用时,由于 P 值难以确定,为了讨论方便,人们常采用实比熔融模型讨论,即假定 $P^i = D_0^i$ 。而在自然界的实际岩浆过程中, $P^i \neq D_0^i$,即为非实比熔融过程。原因是:①玄武岩的源岩地幔二辉橄榄岩,其部分熔融时不可能只有与源岩矿物比例相同的一种熔融模式,即 P^i 不可能总是等于 D_0^i ;②阿尔卑斯型橄榄岩被认为是源岩二辉橄榄岩部分熔融的残余^[3],若为实比熔融地幔残余物应是二辉橄榄岩,因实比熔融中源岩与残余岩的矿物比例不变,而它们主要由橄榄石与斜方辉石组成,表明应为非实比熔融。所以,非实比熔融在自然界是普遍存在的。

2 P 值与熔融模式及其对熔体成分的影响

在一定的条件下,元素 i 在矿物相与熔体之间的分配系数是不变的^[2]。因而 P^i 值的大小只会随部分熔融的熔融模式的不同而变化。 P^i 值与 D_0^i 值的关系是:当熔融模式(进入熔体矿物相之间的比例)与源岩中的矿物相比例相同时, $P^i = D_0^i$;当熔融模式变化时, P^i 值可大于 D_0^i 值,或小于 D_0^i 。 P^i 值的大小及其变化偏离(大于或小于) D_0^i 值的程度,除取决于熔融模式之外,不同的元素表现也不一样,这是 P 值难以确定与估计的原因。

为了评估熔融模式变化对不同元素 P 值大小变化的影响,本文将按相容元素(如 Ni)、弱不相容元素(如 Yb)、强与中等不相容元素(如 La 等)分别考虑。假定一个原始的地幔源岩中由 Cpx : Opx : Ol : Gt = 25 : 25 : 40 : 10 组成^[4],作者计算了几种具有代表性熔融模式的元素 Ni、Yb、La 的 P 值,计算所用元素 La、Yb 的分配系数引自[3]及转引[2],Ni 的分配系数数据[5]与 Hanson(1975)转引[2]。由于不同作者求得的矿物/熔体之间的分配系数 K_D 不同,且有一定的变化范围,因而,据此求得相同的熔融模式的 P 值也有一定的变化范围。不同熔融模式 P 值、 D_0 值列于表 1 中。从计算结果可知:①只要熔融模式变化,均会造成相容元素 Ni 的 P 值大的变化, P^{Ni} 会远离 D_0^{Ni} 的值。②对于弱不相容元素 Yb,当熔融模式接近源岩的矿物相比例时, P 值相对于 D_0 值变化不大,当熔融模式出现大的变化(如 Cpx : Opx : Ol : Gt = 60 : 0 : 0 : 40 时), P^{Yb} 值大大偏离 D_0^{Yb} 值。③对于不相容元素 La,当熔融模式出现变化时, P^{La} 值可大于或小于 D_0^{La} 值,但 P^{La} 与 D_0^{La} 之间的差异不大,就是最极端变化, Cpx : Opx : Ol : Gt = 90 : 0 : 0 : 10, P^i 值也仅为 0.109。

表 1 熔融模式与 P 值的关系

Table 1 Relationship between melting modes and P values

熔融模式 (质量百分比) Cpx : Opx : Ol : Gt	P^{Ni}	P^{Yb}	P^{La}
10 : 40 : 40 : 10	5.31—8.32	0.459—0.492	0.011—0.014
30 : 20 : 20 : 30	2.92—5.36	1.312—1.443	0.010—0.039
40 : 0 : 0 : 60	0.44—2.08	2.538—2.816	0.0082—0.054
60 : 0 : 0 : 40	0.63—2.12	1.792—1.972	0.012—0.076
90 : 0 : 0 : 10	0.970—3.68	0.673—0.711	0.018—0.109
25 : 25 : 40 : 10 D_0	5.31—7.93	0.945—0.534	0.013—0.031

$K_D^{Cpx/La} = 0.02, 0.12; K_D^{Opx/La} = 0.0012, K_D^{Ol/La} = 0.02, 0.0004; K_D^{Gt/La} = 0.0007, 0.1;$
 $K_D^{Cpx/Yb} = 0.29, 0.30; K_D^{Opx/Yb} = 0.009, 0.06; K_D^{Ol/Yb} = 0.023, 0.00522; K_D^{Gt/Yb} = 4.5, 4.03;$
 $K_D^{Cpx/Ni} = 1.00, 4.00; K_D^{Opx/Ni} = 1.6, 60; K_D^{Ol/Ni} = 12.00, 13.00; K_D^{Gt/Ni} = 0.067, 0.80$
 每个元素矿物/熔体分配系数的不同值为不同作者的结果,所据文献见正文。

熔融模式的不同会引起 P 值的变化,而 P 值的大小如何影响熔体成分的变化仍是不清楚的。由于熔融模式的 P 值有一定的范围,为了讨论的方便,本文选取代表性的 P 值来计算。下面先考虑批式熔融过程,从图 1-a 可知,在相同的部分熔融程度下,相容元素 Ni 的 P 值变化时,会导致熔体中 Ni 浓度大的变化;图 1-b 则表明,弱不相容元素 Yb,当 P 值较大地

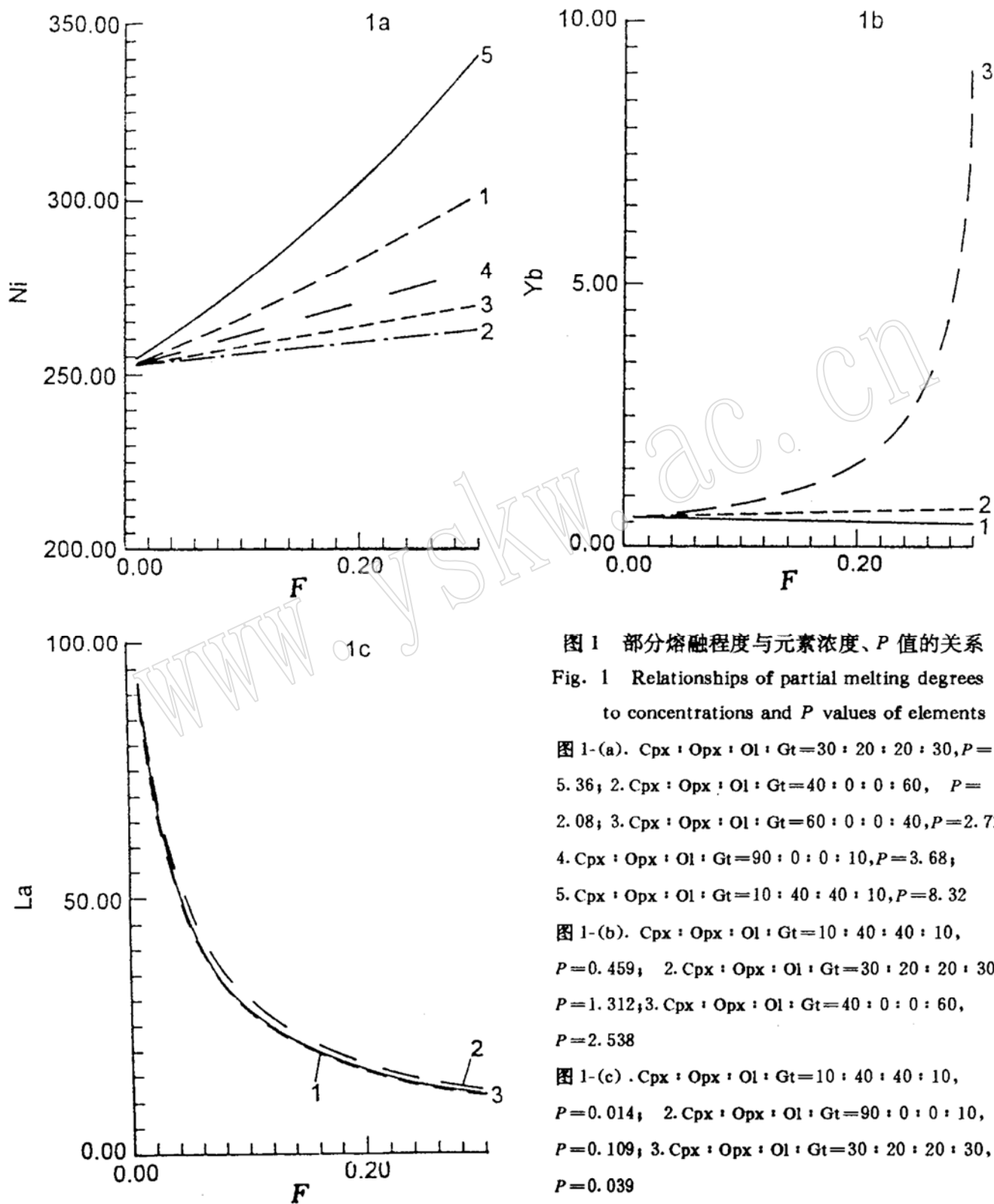


图 1 部分熔融程度与元素浓度、 P 值的关系

Fig. 1 Relationships of partial melting degrees to concentrations and P values of elements

图 1-(a). Cpx : Opx : Ol : Gt = 30 : 20 : 20 : 30, $P = 5.36$; 2. Cpx : Opx : Ol : Gt = 40 : 0 : 0 : 60, $P = 2.08$; 3. Cpx : Opx : Ol : Gt = 60 : 0 : 0 : 40, $P = 2.72$; 4. Cpx : Opx : Ol : Gt = 90 : 0 : 0 : 10, $P = 3.68$; 5. Cpx : Opx : Ol : Gt = 10 : 40 : 40 : 10, $P = 8.32$

图 1-(b). Cpx : Opx : Ol : Gt = 10 : 40 : 40 : 10, $P = 0.459$; 2. Cpx : Opx : Ol : Gt = 30 : 20 : 20 : 30, $P = 1.312$; 3. Cpx : Opx : Ol : Gt = 40 : 0 : 0 : 60, $P = 2.538$

图 1-(c). Cpx : Opx : Ol : Gt = 10 : 40 : 40 : 10, $P = 0.014$; 2. Cpx : Opx : Ol : Gt = 90 : 0 : 0 : 10, $P = 0.109$; 3. Cpx : Opx : Ol : Gt = 30 : 20 : 20 : 30, $P = 0.039$

$C_{Ni}^0 = 2000 \times 10^{-6}$, $C_{Yb}^0 = 0.3 \times 10^{-6}$, $C_{La}^0 = 3.7 \times 10^{-6}$

偏离 D_0 时,也会导致熔体中 Yb 浓度大的变化;而在图 1-c 中,不相容元素 La ,在相同的部分熔融程度下, P 值变化时,仅导致熔体中 La 的浓度较小的变化,因此在考虑地幔的部分熔融过程时,对于相容元素与弱不相容元素,必须考虑熔融模式与 P 值大小,不能将 D_0 值代替 P 值,因为不同的 P 值会形成不同成分的熔体;而对于不相容元素特别是强不相容元素,则可视 $P=D_0$,此时,在相同的部分熔融程度下,用 D 值代替 P 值计算得到的熔体成分与考虑 P 值计算的熔体成分之间的差异,在测试误差范围之内。

上述结果仅考虑了非实比批式熔融,对于非实比的分离熔融与收集熔融,考虑 P 值对熔体成分的影响,其结果与非实比批式熔融得出的结论基本相同。根据非实比分离熔融与收集熔融模型可知,两种熔融方式要求 $(1-P \cdot F/D_0) > 0$,即 $P \cdot F/D_0 < 1$,因而 P 与 D_0 值的差异不能太大,一些极端的熔融模式实际上是不存在的。这样,分离熔融与收集熔融相对于批式熔融 P 值对熔体成分的影响较小,但相容、弱不相容、不相容元素的变化规律是一致的。限于篇幅,有关图件与讨论在此省略。

3 P 值对熔体 REE 模式的影响

元素比值 La/Yb 可反映岩石稀土元素配分模式中轻重稀土的亏损与富集情况。当 $(La)_N/(Yb)_N$ 大于 1 时,REE 模式为 LREE 富集型,等于 1 时为平坦型,小于 1 时为 LREE 亏损型。图 2 说明了不同 P 值对 $(La)_N/(Yb)_N$ 的影响。从图 2-a 中可看出,非实比的批式熔融在相同的部分熔融程度下,当 $F > 0.05$ 时,不同的 P 值会造成熔体 $(La)/(Yb)$ 比值的变化,而这种变化主要是由于 P^{Yb} 值的不同而造成熔体中 Yb 的浓度变化的, P^{Yb} 的增大导致 La/Yb 值变小,也就是 LREE 的富集程度降低,如当 $F > 0.2$ 时,不同的 P 值可使得有的 $(La)_N/(Yb)_N$ 值大于 1,而有的 $(La)_N/(Yb)_N$ 值接近 1,甚至小于 1。因此,玄武岩中稀土元素的分配型式,除了与地幔源岩的浓度和部分熔融程度有关外,还与熔出岩浆的 P 值有关。非实比的收集熔融(图 2-b)与分离熔融(图略),由于上述 P 值不能过大地偏离 D_0 值,因而 P 值对 La/Yb 比值的影响相对较小,其中分离熔融过程 P 值对 La/Yb 比值的影响最小。因此,源岩相同,由于 P 值与熔融模式不同,也可熔出轻稀土亏损与富集的不同的岩浆类型。

由此可知,玄武岩等幔源岩石 REE 的分配模式,除了前人认为的与源岩组成、部分熔融程度有关外,LREE 的亏损与富集程度还与 P 值有关,REE 模式应是它们三者综合影响的结果。在自然界考虑用 REE 模式讨论岩石成因时,对于较大部分熔融程度熔出的岩浆岩,必须考虑 P 的影响。比如一套大洋拉斑玄武岩,常具有 REE 平坦型与 LREE 亏损型两种稀土模式,它们肯定源于相同的源岩,并被认为是较高部分熔融程度的熔融产物,由于它们的部分熔融程度近似,源岩又相同,因而它们具有的两种 REE 模式的差异很有可能是由不同的 P 值熔融形成的。

4 P 值对 $(C^i/C^j)/(C_0^i/C_0^j)$ 比值的影响

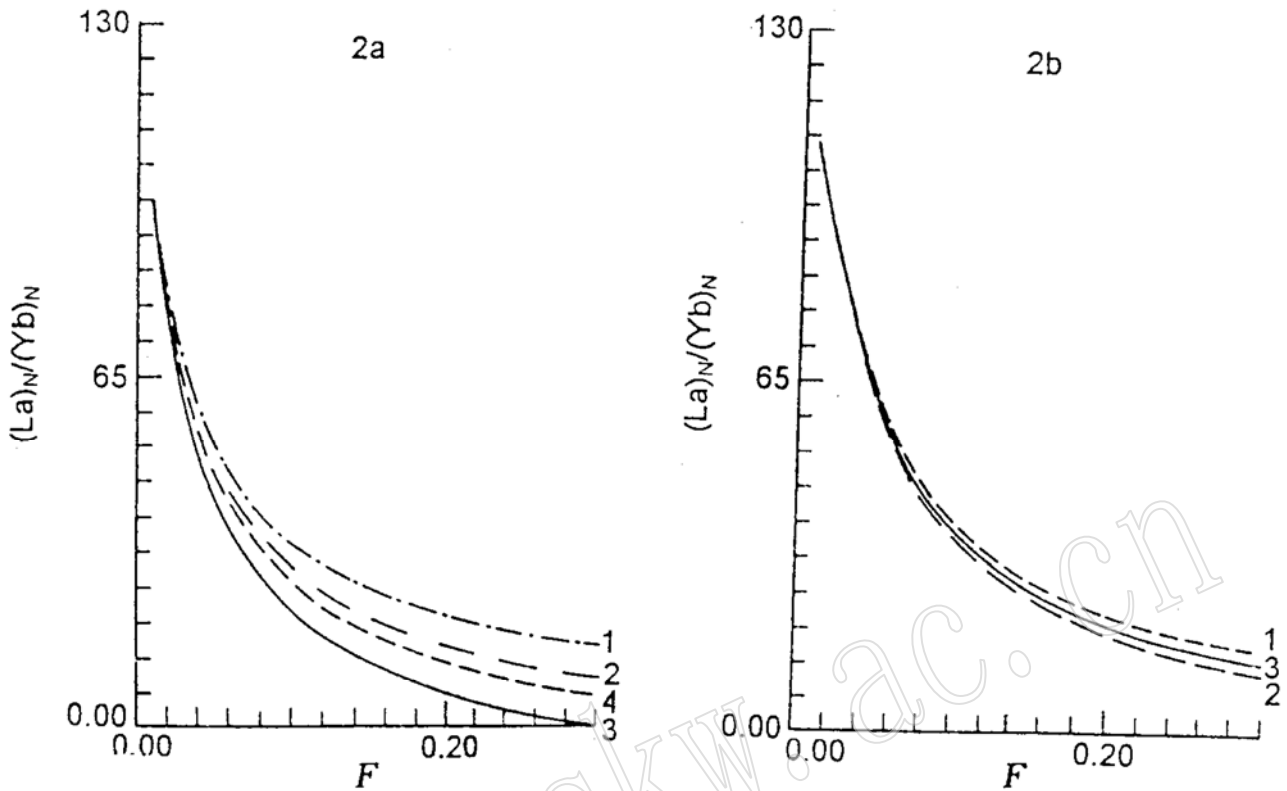


图2 不同部分熔融程度与 $(La)_N/(Yb)_N$ 比值、 P 值的关系

Fig. 2 Relationships of different partial melting degrees to $(La)_N/(Yb)_N$ ratios and P values

图2-a 非实比批式熔融

1. Cpx : Opx : Ol : Gt = 10 : 40 : 40 : 10, $P^{La} = 0.014$, $P^{Yb} = 0.459$; 2. Cpx : Opx : Ol : Gt = 30 : 20 : 20 : 30, $P^{La} = 0.039$, $P^{Yb} = 1.312$; 3. Cpx : Opx : Ol : Gt = 40 : 0 : 0 : 60, $P^{La} = 0.054$, $P^{Yb} = 2.538$; 4. Cpx : Opx : Ol : Gt = 60 : 0 : 0 : 40, $P^{La} = 0.076$, $P^{Yb} = 1.792$

图2-b 非实比收集熔融

1. Cpx : Opx : Ol : Gt = 10 : 40 : 40 : 10, $P^{La} = 0.014$, $P^{Yb} = 0.459$; 2. Cpx : Opx : Ol : Gt = 30 : 20 : 20 : 30, $P^{La} = 0.039$, $P^{Yb} = 1.312$; 3. Cpx : Opx : Ol : Gt = 50 : 20 : 20 : 10, $P^{La} = 0.061$, $P^{Yb} = 0.566$, $C_0^{Yb} = 0.3 \times 10^{-6}$, $C_0^{La} = 3.7 \times 10^{-6}$.

汪云亮^[6]、郑海飞^[7]研究了实比熔融过程,指出不相容元素的比值可反映源岩的比值。这一结论未考虑非实比熔融,也就是未考虑 P 值的影响。对于一个非实比批式熔融过程:

$$(C^i/C^j)/(C_0^i/C_0^j) = \frac{(D_0^i + F(1 - P^i))}{(D_0^j + F(1 - P^j))} \quad (4)$$

当上式右边等于或接近 1 时,则表明 $(C^i/C^j)/(C_0^i/C_0^j)$, 即岩浆中元素对的比值等于源岩中的比值;该值远远偏离 1 时,则表明岩浆中元素对比值不等于源岩中的比值。下面选取不同的 D_0^i 、 P^i 、 P^j 值来讨论。从图 3-a 中可知,当 D_0^i 与 D_0^j 值相同时, P^i 、 P^j 值的不同会造成 R 值 $(C^i/C^j)/(C_0^i/C_0^j)$ 的不同;且只有 D_0^i 、 $D_0^j \leq 0.05$, P^i 、 $P^j \leq 0.1$ 左右时,熔体与源岩的两元素比值才接近。从图 3-b 中可知,当 $D_0^i \neq D_0^j$, $P^i > D_0^i$, $P^j > D_0^j$ 时,大部分情况下, $(C^i/C^j)/(C_0^i/C_0^j)$ 偏离于 1, 只有 D_0^i 、 $D_0^j \leq 0.05$ 左右,且 P^i 、 P^j 值与 D_0^i 、 D_0^j 相差不大时,熔体与源岩比

值才接近。因此, P 值的不同对熔体与源岩元素比值的差异是有影响的, 要消除 P 值的影响, 使得熔体的元素比值能反映源岩的比值, 只有选择不相容元素 (D 值 ≤ 0.05 左右) 特别是强不相容元素, 熔体中这些元素的比值才能反映源区的特征。

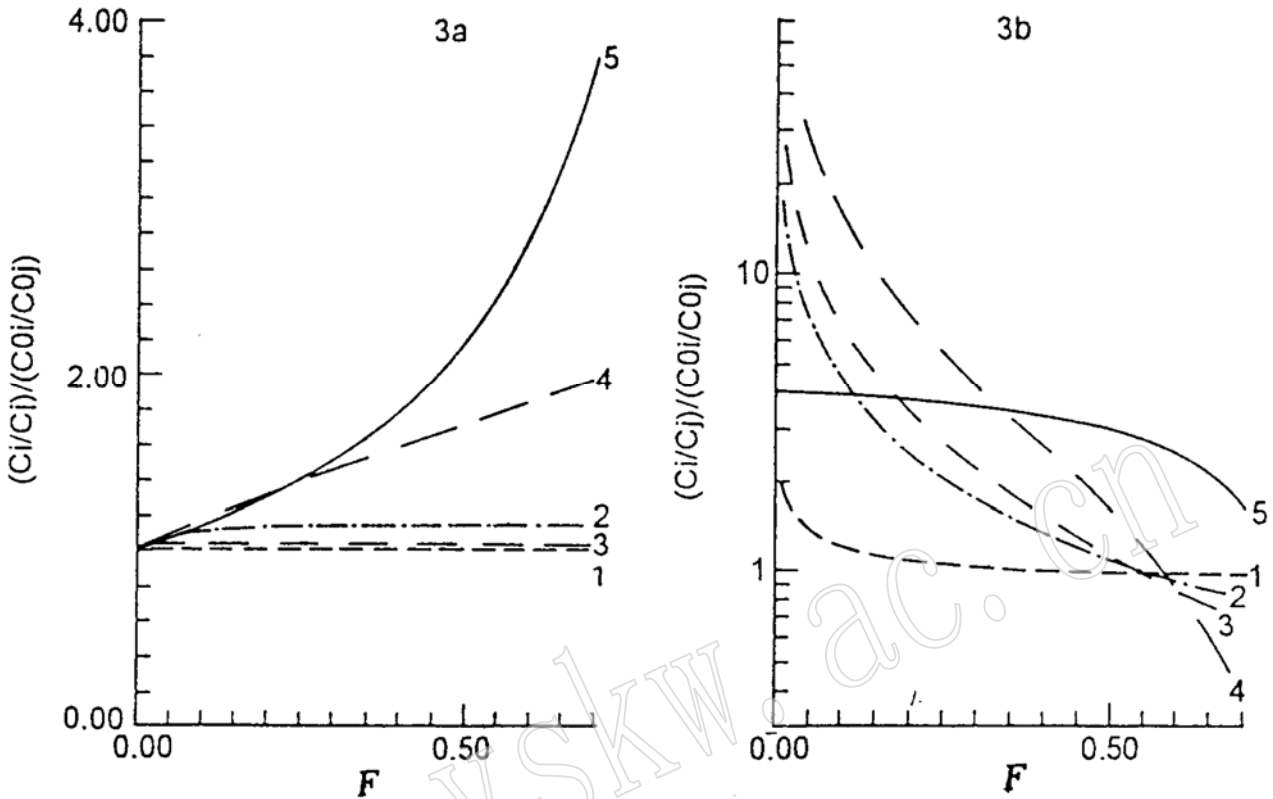


图3 不同部分熔融程度与 P 值、 D 值及元素比值的关系

Fig. 3 Relationships of different partial melting degree to P values, D values and ratios of elements

图3-a 1. $D_0^i=0.05$ $P^1=0.025$ $D_0^j=0.05$ $P^2=0.01$; 2. $D_0^i=0.005$ $P^1=0.05$ $D_0^j=0.005$ $P^2=0.01$; 3. $D_0^i=0.05$ $P^1=0.15$ $D_0^j=0.05$ $P^2=0.01$; 4. $D_0^i=0.5$ $P^1=0.9$ $D_0^j=0.5$ $P^2=0.1$; 5. $D_0^i=0.5$ $P^1=1.5$ $D_0^j=0.5$ $P^2=0.9$;

图3-b 1. $D_0^i=0.02$ $P^1=0.09$ $D_0^j=0.05$ $P^2=0.15$; 2. $D_0^i=0.02$ $P^1=0.09$ $D_0^j=0.5$ $P^2=0.95$; 3. $D_0^i=0.02$ $P^1=0.09$ $D_0^j=0.8$ $P^2=1.5$; 4. $D_0^i=0.02$ $P^1=0.09$ $D_0^j=2$ $P^2=3.5$; 5. $D_0^i=0.5$ $P^1=1.5$ $D_0^j=2$ $P^2=3.5$

5 P 值的计算

对于部分熔融岩浆过程, P 值较难确定, 但是当源岩成分已知时, 可据以下方法^[8]求出实际的 P 值:

对于非实比批式熔融过程, 元素比值遵循下式^[4]:

$$\frac{C^i}{C^j} = [D^i - D^j \left(\frac{1-P^j}{1-P^i} \right)] \frac{C_0^i}{C_0^j} + \frac{C_0^i}{C_0^j} \left(\frac{1-P^j}{1-P^i} \right) \quad (5)$$

若选取一个强不相容元素 C^i , 使 $D_0^i \approx 0$, 这样上式可变为:

$$\frac{C^i}{C^j} = \frac{D^j}{C_0^j} C^i + \frac{C_0^i}{C_0^j} (1-P^j) \quad (5)$$

对于部分熔融形成的一套岩石, 其成分在 $C^i/C^j - C^i$ 图上呈线性关系, 当已知源岩中的

C_0/C_1 , 据 $C_1/C_0 - C_1$ 图上的斜率与截距可分别求出 D' 、 P' 值。

作者据郑海飞玄武岩熔融实验结果^①, 用此方法求得了不同元素的实际 P 与 D_0 值, (见表2)。从表中可知, 该熔融实验中大部分元素的 P 值大于 D_0 值, 少数小于 D_0 值, 其中 Yb 的 P 值为负值, 是由于测试误差所造成的。

表2 玄武岩熔融实验的实际 P 值与 D_0 值

Table 2 Actual P values and D_0 values in melting experiments on basalt

	Cr	Ni	La	Ce	Sm	Yb	Sc	Hf	Th	Ta
D'	1.59	2.21	0.45	0.48	0.64	0.45	0.57	0.42	0.52	0.630
P'	1.66	2.29	0.52	0.53	0.67	-0.4	0.53	0.49	0.58	0.634

需要指出的是, 上述方法只能在已知源岩情况下求取 P 值, 然而, 当源岩组成未知时, 如何求取 P 值, 目前尚无好的方法, 这是一个值得进一步探讨的问题。

6 结论

(1) 非实比熔融过程中, P 值的大小取决于熔融模式。

(2) 相容元素与弱不相容元素的 P 值变化会使熔体成分发生改变, 因此, 用相容元素与弱不相容元素研究部分熔融, 需考虑 P 值大小, 不能用 D_0 代替 P' 值; 而强与中等不相容元素, P 值的变化引起的熔体成分的差异较小, 对于强不相容元素, 可视 $P = D_0$ 。

(3) 玄武岩稀土配分型式除与源岩和部分熔融程度有关之外, 还与部分熔融的 P 值相关。

(4) 在非实比熔融过程中, 只有 D_0 值与 P 值小于 0.05 左右时, 熔体中不相容元素的比值才能反映其源区的特征。

参 考 文 献

- 1 Alle'gre C J and Minster J F. Quantitative models of trace element in igneous petrology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978, 38; 1—25.
- 2 李昌年. 火成岩微量元素岩石学. 中国地质大学出版社, 1992, 29—66.
- 3 Prinzhofer A and Alle'gre C J. Residual peridotites and the mechanisms of partial melting. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1985, 74; 251—265.
- 4 Be'dard J H. Disequilibrium mantle melting. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1989, 91; 559—366.
- 5 Wood B J and Fraser D J. Elementary thermodynamics for geologists, oxford University press. 1978, 23—57.
- 6 汪云亮等. 幔源岩浆岩源区成分判别原理及峨眉山玄武岩地幔源区性质. *地质学报*, 1993, 67; 52—61.
- 7 郑海飞等. 元素比值研究玄武岩源区成分的若干问题讨论. *矿物学报*, 1994, 14; 61—67.
- 8 Clague D A et al. Petrology and trace element geochemistry of the honolulu volcanics. Oahu; implication for the oceanic mantle below Hawaii, *Journal of Petrology*, 1982, 23; 447—504.
- 9 Minster J F et al. Systematic use of trace elements in igneous processes, II, Inverse problem of batch partial melting in volcanic suits. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1978, 68; 37—52.

① 郑海飞(1994)贵阳地球化学研究所博士后研究报告。

A Discussion on Effects of P Values on Chemical Composition of Melts formed by Nonmodal Partial Melting

Xu Jifeng, Zhang Benren

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Key words: nonmodal partial melting; P value; mantle source rock

Abstract

P values of the nonmodal partial melting model depend on the melting mode. Different P values will result in variation of melt composition. Abundances of compatible and weakly incompatible elements in melt vary greatly when P values change, so P values of these elements can not be replaced by D_0 in the melting model. However, abundances of moderately and highly incompatible elements only show small variation when P values are different. It is thought that P values of moderately and highly incompatible elements are equal to D_0 values in the nonmodal partial melting model. When P values are different, a primary rock may form melts different in LREE enrichment or depletion under the same degree of partial melting.