

# 利用原生岩浆定量反演原岩 微量元素丰度的方法

杨 晓 松

(中国地质大学地质系, 武汉 430074)

**主题词** 平衡部分熔融 定量反演 原岩微量元素丰度 汉诺坝 玄武岩

**提 要** 利用同源不同程度平衡部分熔融作用形成的两种原生岩浆岩的微量元素浓度, 提出了一种定量反演原岩微量元素丰度的方法。反演前不需要做任何人为假设, 为定量研究源区的微量元素地球化学提供了一个有力的手段。对汉诺坝新生代橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩的成因及地幔源区特征作了讨论。反演结果显示本区地幔相对球粒陨石有过明显的 REE 富集过程, 并且不同的 REE 富集程度存在显著差异。

## 1 问题的提出

源区岩石的微量元素组成的研究对于讨论源区化学状态、岩浆的形成与演化、地幔区域化学不均匀性等地质问题具有十分重要的意义。随着近二十年微量元素定量模型研究的深入<sup>[1,2]</sup>, 以平衡部分熔融(下简称部分熔融)模型为基础, 在详细讨论原岩微量元素组成方面(平衡部分熔融发生之前源区的微量元素组成)获得一定的进展。然而在以往的研究中, 采取的步骤一般为: (1) 假设原岩微量元素丰度( $C^0$ )和部分熔融程度( $F$ ), 估算元素的总分配系数( $D$ ); (2) 按定量模型计算岩浆中微量元素丰度( $C^L$ ); (3) 将计算结果与实测值对比以判断模型及参数假设的合理性。这种方法, 笔者称之为正演方法。正演方法最大的不足在于计算前须做过多的假设, 这些假设的误差往往相当大, 并且不易估算, 这从原则上限制了定量模型的作用。本文的目的在于提出一种反演原岩微量元素丰度的方法, 即依据在部分熔融过程中, 原岩与原生岩浆之间微量元素所存在的内在关联, 利用原生岩浆的微量元素浓度推演原岩中微量元素的丰度。在计算前无需对原岩微量元素丰度、模型参数作任何假设, 从而排除了由于假设而带人的误差和不确定性。

## 2 原生岩浆的判别

欲利用原生岩浆反演原岩的微量元素丰度, 首先须证明岩浆岩是由部分熔融作用产生的原生岩浆直接冷凝而成的。原生岩浆中微量元素浓度应满足部分熔融作用方程:

本文于1993年3月收到, 1993年6月改回。

$$\frac{C_L}{C^0} = \frac{1}{D+F(1-D)} \quad (1)$$

其中： $C^L$ ——某微量元素在原生岩浆（部分熔融体）中的浓度。

$C^0$ ——某微量元素在原岩中的丰度，

$F$ ——部分熔融程度（%），

$D$ ——残余固相中微量元素的总分配系数。

对于微量元素  $i$  和  $j$ ，(1)式可分别写为：

$$\frac{C_i^L}{C_i^0} = \frac{1}{D_i + F(1-D_i)}, \quad \frac{C_j^L}{C_j^0} = \frac{1}{D_j + F(1-D_j)}$$

消去  $F$ ，得原生岩浆中微量元素对所满足的协变方程：

$$\frac{1}{C_j^L} = K_{ij} \cdot \frac{1}{C_i^L} + B_{ij} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} K_{ij} = \frac{C_j^0(1-D_i)}{C_i^0(1-D_j)} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\begin{cases} B_{ij} = \frac{D_i - D_j}{C_i^0(1-D_j)} \end{cases} \quad (2-2)$$

方程 (2) 的另一种形式是：

$$\frac{C_j^L}{C_i^L} = B_{ij} \cdot C_i^L + K_{ij} \quad (3)$$

方程 (2) 表明，原生岩浆中微量元素对的浓度倒数呈线性关系。岩浆岩样品中，微量元素对的浓度倒数在  $\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_j}$  图中呈显著的直线分布。通过线性拟合，可求得方程 (2) 的系数  $K_{ij}$  和  $B_{ij}$  以及样品间的线性相关系数  $R$ 。若  $R > 0.95$ ，则可以判定岩浆岩是原生岩浆直接冷凝所形成的。由此可见，协变方程 (2) 是检验部分熔融作用的可靠依据。另外，对于玄武岩还可以利用 Frey 等 (1978)<sup>[3]</sup>，邓晋福等 (1984)<sup>[4]</sup>、莫宜学 (1988)<sup>[5]</sup> 提出的确定原生岩浆的多条标准帮助判别。

### 3 地幔原岩微量元素丰度的反演

利用方程 (1) 对原岩平衡部分熔融作用过程的模拟隐含着一个必要条件，即残留固相的总分配系统  $D$  是常数（在特定的物化条件下）。但实际上， $D$  是熔融程度 ( $F$ ) 的函数，只有当  $F$  变化很小时， $D$  才可视为常数。若地幔原岩经历的部分熔融程度  $F$  显著不同时（记为  $F_\alpha$ 、 $F_\beta$ ），则形成性质不同的原生岩浆（记为岩浆  $\alpha$  和岩浆  $\beta$ ，直接冷凝后分别形成岩浆岩  $\alpha$  和岩浆岩  $\beta$ ）。例如：原始地幔低度部分熔融（3%—5%）形成碱性玄武岩浆，富集地幔则可经 7%—15% 的部分熔融产生碱性玄武岩浆 (Sun, 1975)<sup>[6]</sup>；而形成拉斑玄武岩浆的熔融程度一般高达 25%—30%。岩浆岩  $\alpha$  和岩浆岩  $\beta$  所含微量元素浓度会存在明显的差异，与其相对应的残留地幔的总分配系数  $D_\alpha$ 、 $D_\beta$  之间的差别也不再能忽略。因此，岩浆岩  $\alpha$  和  $\beta$  中的微量元素对的倒数将分别满足协变方程 (2)

即：
$$\frac{1}{C_i^a} = K_{ij}^a \frac{1}{C_j^a} + B_{ij}^a \quad (4)$$

$$\frac{1}{C_i^b} = K_{ij}^b \frac{1}{C_j^b} + B_{ij}^b \quad (5)$$

其中：

$$K_{ij}^a = C_j^0(1-D_i^a)/C_i^0(1-D_j^a) \quad (4-1)$$

$$B_{ij}^a = (D_i^a - D_j^a)/C_i^0(1-D_j^a) \quad (4-2)$$

$$K_{ij}^b = C_j^0(1-D_i^b)/C_i^0(1-D_j^b) \quad (5-1)$$

$$B_{ij}^b = (D_i^b - D_j^b)/C_i^0(1-D_j^b) \quad (5-2)$$

由方程 (4-1) 和 (4-2) 可得：

$$\frac{1}{C_i^a} = K_{ij}^a \frac{1}{C_j^a} + B_{ij}^a \quad (4-3)$$

由方程 (5-1) 和 (5-2) 可得：

$$\frac{1}{C_i^b} = K_{ij}^b \frac{1}{C_j^b} + B_{ij}^b \quad (5-3)$$

(4-3) 式和 (4) 式、(5-3) 式与 (5) 式具有完全相同的形式和系数，这表明原岩中微量元素对的倒数是微量元素协变方程 (2) 的一个解，联立方程 (4-3) 和 (5-3) 解得计算  $C_i^0$  和  $C_j^0$  的公式为：

$$\begin{cases} C_j^0 = (K_{ij}^a - K_{ij}^b) / (B_{ij}^b - B_{ij}^a) \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\begin{cases} C_i^0 = (K_{ij}^b - K_{ij}^a) / (B_{ij}^a \cdot K_{ij}^b - B_{ij}^b \cdot K_{ij}^a) \end{cases} \quad (6-2)$$

(4-3)、(5-3) 能联立解  $C_i^0$  和  $C_j^0$  的条件是  $K_{ij}^a \neq K_{ij}^b$ ，由于  $D$  是部分熔融程度  $F$  的函数，因此，当形成岩浆  $\alpha$  和  $\beta$  的部分熔融程度  $F_\alpha$  和  $F_\beta$  明显不同时，其  $D_i^a \neq D_i^b$ ， $D_j^a \neq D_j^b$ 。这保证了  $K_{ij}^a \neq K_{ij}^b$  条件的成立。

从几何意义上分析，由不同熔融程度  $F_\alpha$  和  $F_\beta$  所形成的原生岩浆  $\alpha$  和  $\beta$ ，其微量元素浓度在  $\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_j}$  图上分别构成斜率不等的  $\alpha$  和  $\beta$  直线。由于原岩微量元素对丰度同时满足方程 (4) 和 (5)，所以  $\alpha$  和  $\beta$  直线的交点代表了原岩，交点的坐标值  $\frac{1}{C_i^0}$  和  $\frac{1}{C_j^0}$  为原岩微量元素丰度的倒数。原岩微量元素丰度计算原理见图 1。

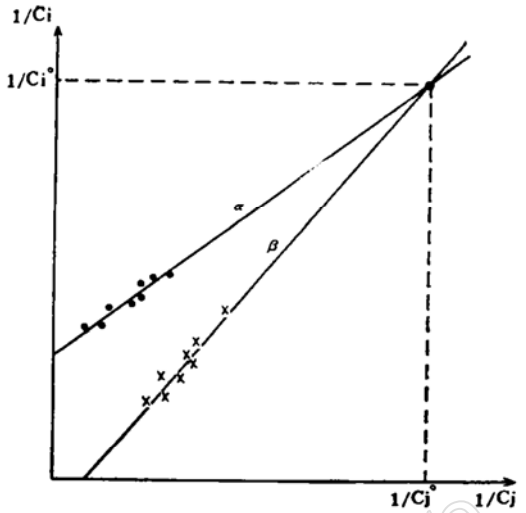


图 1 原岩微量元素丰度计算原理图  
Fig.1 Diagram showing the principle for calculating trace element abundances of source rocks

#### 4 汉诺坝新生代地幔原岩REE 特征

河北省汉诺坝是我国著名的火山岩发育区，其火山熔岩包括碱性玄武岩系列和拉斑玄武岩系列，并且前者常含有丰富的超镁铁质岩包体。前人对该区火山岩做过详细的工作<sup>[7-9]</sup>并集

累了较为丰富的 REE 资料。但是对汉诺坝新生代地幔原岩微量元素组成的定量研究较少。作为新方法的应用, 本文定量计算了汉诺坝新生代地幔源 REE 的组成, 并结合其它资料讨论了该区地幔源的演化。

#### 4.1 计算结果

笔者在计算机上利用协变方程 (2) 分别对收集到的橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩的 REE 浓度<sup>[10,11]</sup>进行线性拟合, 拟合结果令人满意 (大多数的  $R > 0.95$ )。在  $\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_j}$  坐标系中, 橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩样品分别呈现极好的线性关系, 这证明橄榄拉斑玄武岩浆和碱性玄武岩浆是地幔源区经不同部分熔融程度所形成的原生岩浆。以下列举部分 REE 对协变方程和  $\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_j}$  图解 (图 2)。

橄榄拉斑玄武岩 REE 对协变方程:

$$\frac{1}{C_{La}} = 2.08 \frac{1}{C_{Ce}} - 5.195 \times 10^{-3} \quad R = 0.952$$

$$\frac{1}{C_{La}} = 0.769 \frac{1}{C_{Nd}} + 2.243 \times 10^{-2} \quad R = 0.964$$

$$\frac{1}{C_{La}} = 6.687 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Eu}} + 2.518 \times 10^{-2} \quad R = 0.938$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 0.344 \frac{1}{C_{Nd}} + 1.325 \times 10^{-2} \quad R = 0.955$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 8.198 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Sm}} + 1.365 \times 10^{-3} \quad R = 0.961$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 2.810 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Eu}} + 1.163 \times 10^{-2} \quad R = 0.944$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 0.2418 \frac{1}{C_{Sm}} + 4.859 \times 10^{-3} \quad R = 0.972$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 3.655 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Tb}} + 1.375 \times 10^{-2} \quad R = 0.954$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 7.768 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Yb}} + 3.210 \times 10^{-2} \quad R = 0.935$$

$$\frac{1}{C_{Sm}} = 0.415 \frac{1}{C_{Eu}} - 3.247 \times 10^{-2} \quad R = 0.940$$

碱性玄武岩 REE 对协变方程:

$$\frac{1}{C_{La}} = 1.958 \frac{1}{C_{Ce}} + 3.799 \times 10^{-3} \quad R = 0.988$$

$$\frac{1}{C_{La}} = 0.9004 \frac{1}{C_{Nd}} - 3.435 \times 10^{-5} \quad R = 0.973$$

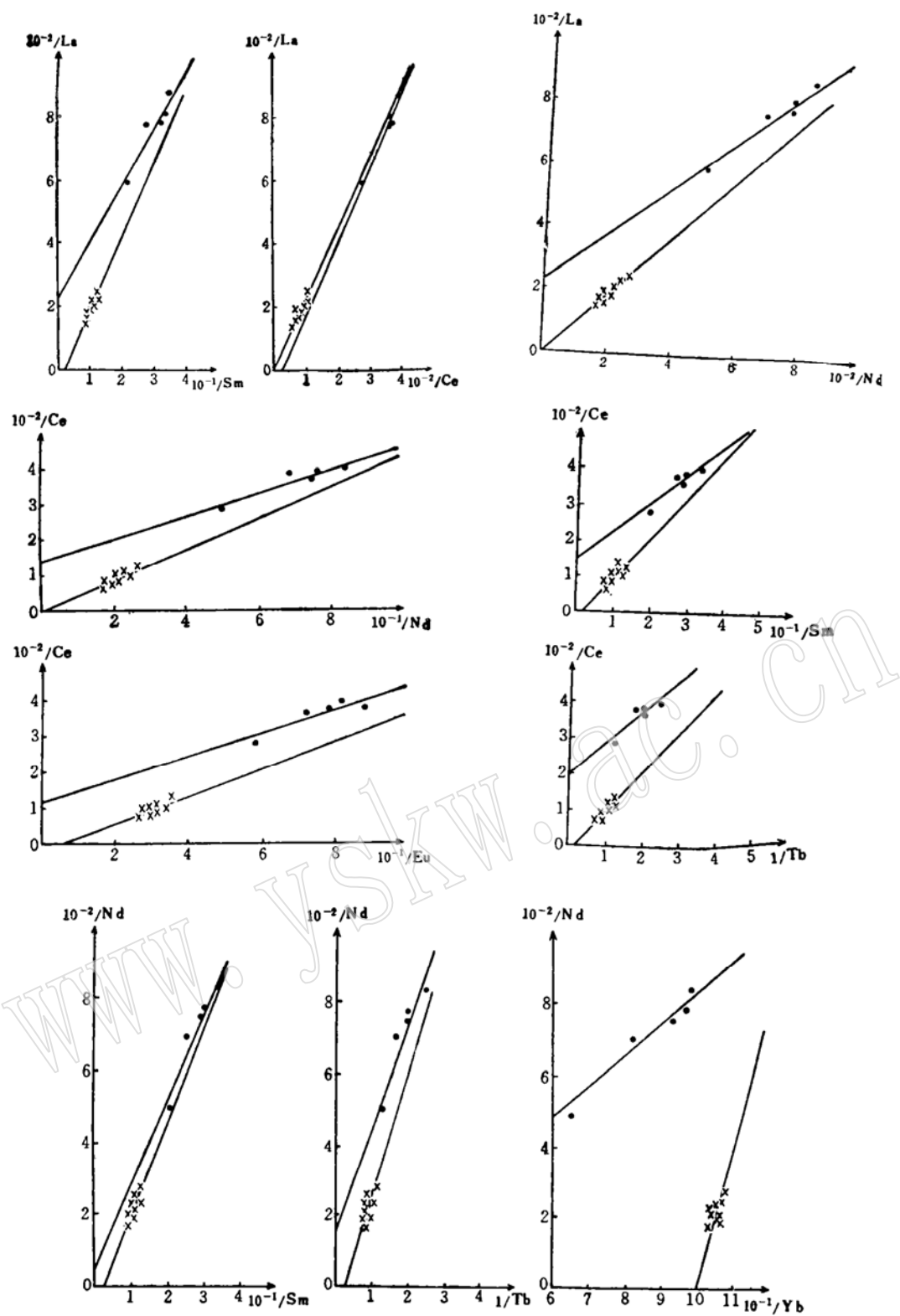


图 2 汉诺坝火山岩 REE 对协变图

Fig. 2 Covariance diagram of REE pairs in Hannuoba basalts

×—碱性玄武岩；•—橄榄拉斑玄武岩

$$\frac{1}{C_{La}} = 0.2416 \frac{1}{C_{Sm}} - 5.587 \times 10^{-8} \quad R = 0.956$$

$$\frac{1}{C_{La}} = 8.088 \times 10^{-8} \frac{1}{C_{Eu}} - 3.437 \times 10^{-8} \quad R = 0.982$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 0.4275 \frac{1}{C_{Nd}} - 1.638 \times 10^{-4} \quad R = 0.990$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 0.1080 \frac{1}{C_{Sm}} - 1.951 \times 10^{-8} \quad R = 0.977$$

$$\frac{1}{C_{Ce}} = 3.488 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Eu}} - 1.332 \times 10^{-8} \quad R = 0.975$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 0.2620 \frac{1}{C_{Sm}} - 5.628 \times 10^{-8} \quad R = 0.966$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 4.445 \times 10^{-2} \frac{1}{C_{Tb}} - 7.78 \times 10^{-8} \quad R = 0.947$$

$$\frac{1}{C_{Nd}} = 0.4312 \frac{1}{C_{Yb}} - 0.5643 \quad R = 0.937$$

$$\frac{1}{C_{Sm}} = 0.2975 \frac{1}{C_{Eu}} + 0.1302 \quad R = 0.982$$

莫宣学 (1988)<sup>[5]</sup>用多种方法对中国东部新生代玄武岩的成因进行判别研究发现,碱性玄武岩和橄榄拉斑玄武岩具有原生岩浆特征。Basu(1991)<sup>[11]</sup>的研究也表明,汉诺坝碱性玄武岩浆和橄榄玄武岩浆是经部分熔融作用所形成。解广轰等 (1989)<sup>[12]</sup>在对汉诺坝玄武岩进行了同位素地球化学研究后指出,该区的碱性玄武岩和橄榄拉斑玄武岩来自相同的源区,并且未受到地壳物质的明显污染。由此可见,汉诺坝地区这两个系列的玄武岩浆属同源原生岩浆,适合反演计算的要求。

利用公式(6-1)和(6-2)反演了地幔原岩的REE丰度 $C^0$ ,其结果列于表1,表1中同时还列出碱性玄武岩、橄榄拉斑玄武岩REE的平均值,以及球粒陨石的REE丰度,以资对比。

表1 汉诺坝玄武岩、地幔原岩REE丰度(ppm)

Table 1 REE abundances of the basalts and source rocks in Hannuoba area

	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb
地幔原岩REE丰度 $C^0$	5.74	14.72	7.37	1.81	0.57	0.37	0.58
碱性玄武岩REE浓度 $C_L^1$	57.43	114.86	51.57	10.49	3.38	1.10	1.42
橄榄拉斑玄武岩REE浓度 $C_L^2$	16.16	32.27	16.99	4.15	1.50	0.61	1.28
原始地幔REE丰度*	0.71	1.85	1.37	0.45			0.477
球粒陨石REE丰度**	0.310	0.808	0.600	0.195	0.0735	0.0474	0.209

\* McDonough等1985, \*\* Henderson, 1984.

### 4.2 计算结果讨论

从给出的部分玄武岩 REE 对协变方程可见，协变方程的斜率变化是有规律的，由于  $D_{La}$ 、 $D_{Ce}$ 、 $D_{Nd}$ 、 $D_{Sm}$ 、 $D_{Eu}$  都在  $10^{-2}$  量级，因此，对于由 La、Ce、Nd、Sm、Eu 构成的元素对，其  $K_{Li}^O = \frac{C_i^O(1-D_i)}{C_i^O(1-D_i)} = \frac{C_i^O}{C_i^O}$ ，又因  $C_{Ce}^O > C_{La}^O = C_{Nd}^O > C_{Sm}^O > C_{Eu}^O$ ，故有  $K_{La,Ce}^L > K_{La,Nd}^L$

$> K_{La,Sm}^L > K_{La,Eu}^L$ ； $K_{Ce,Nd}^L > K_{Ce,Sm}^L > K_{Ce,Eu}^L$  等系统变化。

从图 3 可见，橄榄拉斑玄武岩、碱性玄武岩的 REE 配分模式呈右倾斜，具有明显的相似性，反映出二者具有同源性。但后者的  $\Sigma$ REE 含量较前者高，更加富集 LREE，表明形成碱性玄武岩浆的部分熔融程度较低，原岩的 REE 配分也呈右倾斜模式，并近似与橄榄拉斑玄武岩的配分模式平行，说明橄榄拉斑玄武岩是地幔原岩较程度部分熔融的结果。

从原岩的 REE 丰度可以看出，新生代汉诺坝地区上地幔源的 REE 相对球粒陨石明显富集，而且不同的 REE 富集程度存在显著的差异。总体而言，LREE 较 HREE 富集程度高得多，由 La 到 Yb，富集程度依次降低，从 18.5 降至 2.8。 $(La/Sm)_N = 2.0$ ， $(La/Yb)_N = 6.7$ 。已发表的该区玄武岩及包体的 Sr—Nd—Pb 同位素数据<sup>[11-13]</sup>表明，汉诺坝地区上地幔源区具有同位素长时间亏损特征，这与其 REE 强烈富集呈鲜明的对照，因此可以判定，本区上地幔在部分熔融事件发生以前，至少经历了长时间的同位素亏损积累和近期 REE 富集两个过程。

目前，对大陆碱性玄武岩浆的熔融程度有不同的认识，其一认为，原始地幔极低度的熔融 (<5%) 产生碱性玄武岩浆；其二认为，碱性玄武岩浆主要是由 REE 富集型地幔 7%—15% 部分熔融的产物 (Sun 1975)<sup>[6]</sup>。由方程 (1) 可得：

$$F_i = \left[ \frac{C_i^O}{C_i^L} - D_i \right] / (1 - D_i) \quad (7)$$

汉诺坝地区碱性玄武岩中二辉橄榄岩包体的平均矿物含量为 OI52 OPx30 CPx16 Sp2。利用 Wood (1978)<sup>[14]</sup>提供的地幔矿物相与熔体间稀土元素的分配系数，估算得  $D_{Ce} = 0.026$ ， $D_{Sm} = 0.06$ ， $D_{Eu} = 0.054$  代入 (7) 式 ( $C_i^L$  用平均值) 得  $F_{Ce} = 10.5\%$ ， $F_{Sm} = 11.9\%$ ， $F_{Eu} = 12.1\%$ ，平均为 11.5%。此结果与赵大升等 (1987)<sup>[15]</sup>用扣除法估算出的该区碱性玄武岩浆部分熔融程度 (8.2%—9.2%) 很接近。

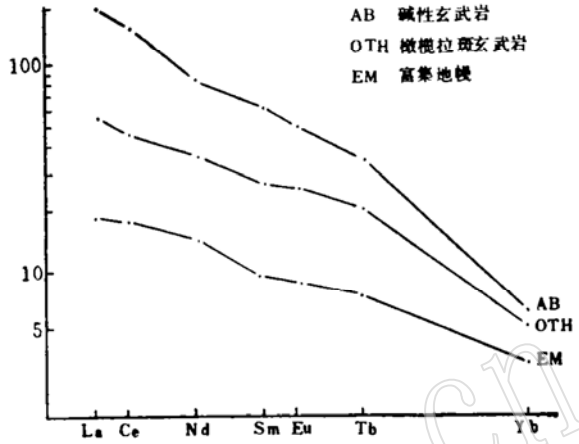


图 3 汉诺坝玄武岩及地幔原岩 REE 配分图  
Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of Hannuoba basalts and the mantle

## 5 主要结论

(1) 由平衡部分熔融作用所形成的原生岩浆与其微量元素倒数呈线性协变关系, 依据这种内在关联, 本文提出反演原岩微量元素丰度的方法。反演之前, 不必对原岩微量元素丰度、部分熔融程度及总分配系数作假设, 从而排除了正演方法本身存在的不确定性。该方法对于定量分析源区化学组成、讨论地幔、地壳物质组成不均匀性等基础地质问题, 具有重要意义。

(2) 平衡部分熔融作用是产生汉诺坝地区新生代玄武岩的主导作用, 碱性玄武岩浆是地幔原岩的11.5%部分熔融的产物。

(3) 汉诺坝地区的上地幔强烈富集REE, 并且不同的REE富集程度差异明显, LREE富集程度高, HREE富集程度相对较低。Sr—Nd—Pb同位素研究显示, 该区上地幔具有同位素长时间亏损的特征, 所以, REE富集过程发生在近期。

承蒙邱家骥教授详细审阅了全文并提出宝贵的修改意见, 谨致谢意!

### 参 考 文 献

- 1 Minster J F et al. Systematic use of trace elements in igneous processes, III. Inverse problem of batch partial melting in volcanic suites. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1978, 68: 37—52.
- 2 Allegre C J et al. Quantitative method of trace elements behavior in magmatic processes, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978, 38: 1—25.
- 3 Frey F A et al. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South-Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *J. petrol.* 1978, 19: 463—513.
- 4 邓晋福. 原生玄武岩浆的起源及其识别标志. *地质研究*, 1984, (2): 17.
- 5 莫宣学. 中国东部新生代玄武岩浆的起源. *中国东部新生代玄武岩及上地幔研究*. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988, 108—125.
- 6 Sun A S et al. Evolution of the mantle, geochemical evidence from alkali basalt. *Geology*, 1975, 3: 297—307.
- 7 邱家骥等. 汉诺坝陆相枕状熔岩特征及其形成的岩浆动力学机理. *矿物学岩石学论丛*, 1988, (4): 10—17.
- 8 丛柏林. 万全县大麻坪玄武岩及其超镁铁质岩包体的稀土元素地球化学. *科学通报*, 1982, (7): 426—429.
- 9 邓晋福等. 汉诺坝玄武岩中超镁铁岩包体及其推导的上地幔性质. *矿物学岩石学论丛*, 1988, (4): 18—30.
- 10 支贇臣. 汉诺坝含超镁铁质岩包体的碱性玄武岩微量元素地球化学. *地球化学*, 1989, (2): 149—157.
- 11 Basu A R et al. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rock of Eastern china: Implication for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991, 105: 149—169.
- 12 解广表等. 汉诺坝玄武岩及大同火山岩群的岩石学 and 同位素地球化学. *地球化学*, 1989, (4): 277—285.
- 13 Yan S et al. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, Eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chemical Geol.* 1990, 85: 35—52.
- 14 Wood B J et al. *Elementary thermodynamics for geologists*. Oxford Univ. Press. 1978.
- 15 赵大升等. 华北地区新生代玄武质火山岩及超镁铁岩包体. *中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体*. 北京: 科学出版社, 1978, 256—268.



## The Application of Primary Magma to the Quantitative Inverse Calculation of Trace Element Abundances of Source Rocks

Yang Xiaosong

(Department of Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Key words:** equilibrium partial melting; quantitative inverse calculation; initial abundance of trace element; Hannuoba

### Abstract

Using trace element concentrations of consanguineous primary magmas formed by different degrees of equilibrium partial melting, the author has put forward an inverse method for quantitatively calculating trace element abundances of source rocks. In the inverse calculation, there is no need to assume parameters such as  $C^0$ ,  $D$  and  $F$ , so it provides an effective means for studying geochemical composition of the provenance.

In addition, the paper has dealt with the genesis of the Cenozoic olivine tholeiites and alkali basalts and the characteristics of the upper mantle in Hannuoba area. The inverse results show that the upper mantle had obviously undergone enrichment of REE relative to chondrite before the melting process, with different rare earth elements experiencing obviously different degrees of enrichment.