

一种改进的简单的估算原始岩浆的方法

——以峨眉山大火成岩省丽江苦橄岩为例

李永生¹⁾, 张招崇¹⁾, 聂保锋²⁾

1) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京, 100083;

2) 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京, 100048

内容提要:利用橄榄石和熔浆的 Fe—Mg 分配系数, 制作了 MgO—FeO 演化图解。根据 MgO—FeO 体系中 Fo [橄榄石的 Fo 值: $Fo = \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Mg}) + n(\text{Fe})}$] 等值线与 Fe—Mg 演化曲线交点确定原始岩浆成分。该图解优点在于可以更简单、直观地判别原始岩浆成分, 适用于橄榄石分离结晶体系。同时介绍了该图解的使用方法, 并以峨眉山大火成岩省丽江地区的大具与仕满两个剖面的苦橄岩为例, 说明如何应用该图解来恢复原始岩浆以及解释岩石的成因。研究表明, 仕满地区原始岩浆 MgO、FeO 含量分别为 23.5% 和 12.8%, 部分熔融程度较高, SM-14 和 SM-15 是由仕满原始岩浆经过轻度橄榄石分离结晶形成的, 基本可以代表原始岩浆成分。大具地区原始岩浆可分为两类, 一类部分熔融程度较低, MgO、FeO 含量分别为 19.8% 和 11.3%; 另一类部分熔融程度较高, MgO、FeO 含量分别为 23% 和 13.3%, 与仕满原始岩浆成分类似。大具地区的岩石样品成分均不能代表该地区的原始岩浆成分, 而是经历了明显的橄榄石分离结晶作用。另外, 峨眉山大火成岩省中绝大多数的玄武岩中 CaO 含量不符合橄榄石分离结晶关系, 并且 MgO 含量一般都低于 8%, 以及岩石中普遍出现单斜辉石和斜长石矿物等都表明这些玄武岩不可能由地幔部分熔融形成的原始岩浆直接通过橄榄石分离结晶作用形成。

关键词:原始岩浆; 分配系数; 质量平衡; 峨眉山大火成岩省

地幔通过部分熔融产生原始岩浆 (primitive magma) 的过程尚难实现实验室的模拟 (Asimow and Longhi, 2004), 原始岩浆上升过程中发生的分离结晶和同化混染作用进一步改变了岩浆的化学成分, 这都增加了岩浆演化过程的复杂性。近年来, 如何利用熔岩成分计算地幔部分熔融产生的原始岩浆和评估在地壳、地幔中橄榄石分离结晶对原始岩浆成分的影响等受到很多学者的关注 (Roder and Emslie, 1970; Hanson and Langmuir, 1978; Ulmer, 1989; Langmuir et al., 1992; Nisbet et al., 1993; Hauri, 1996; Larsen and Pedersen, 2000; Thompson and Gibson, 2000; Herzberg and O' Hara, 2002; Herzberg and Asimow, 2008), 这些问题也是讨论原始岩浆的关键。

关于原始岩浆成分的恢复, 前人多是用简单的质量平衡原理 (Langmuir et al., 1992; Nisbet et al., 1993; Hauri, 1996; Larsen and Pedersen, 2000;

Thompson and Gibson, 2000; 张招崇和王福生, 2003) 来进行计算, Herzberg and O' Hara (2002) 通过对各种元素在橄榄石和熔体中分配系数的讨论, 建立了一个完整的迭代算法计算原始岩浆的成分, 该方法更接近真实的岩浆橄榄石分离结晶演化系统, 但该方法计算比较复杂, 而且在计算过程中橄榄石中的 Ca、Ni、Na 等元素对恢复的原始岩浆成分几乎没有影响。

本文在前人研究的基础上 (张招崇和王福生, 2003; Herzberg and O' Hara, 2002; Herzberg and Asimow, 2008), 进一步探索了原始岩浆成分的计算问题, 提出一种更简单、方便的方法来约束橄榄石分离结晶系列的原始岩浆成分。该方法充分考虑了橄榄石斑晶和围岩捕虏体的影响。在原始岩浆只有橄榄石分离结晶作用的情况下, 利用结晶出的橄榄石与熔体平衡情况下对应的 Fo 值与熔体 MgO、FeO 的含量关系, 制作 MgO—FeO 演化图解估算原始岩浆

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号 40925006)、国家 973 项目 (编号 2009CB421002) 和 111 计划 (编号 B07011) 的成果。

收稿日期: 2011-04-11; 改回日期: 2011-03-22; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 李永生, 1981 年生, 博士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: yongsheng4733@163.com。通讯作者: 张招崇, Email: zczhang@cugb.edu.cn。

成分。该方法既运用了橄榄石与熔体的质量平衡关系和 Fe—Mg 分配系数 (Nisbet et al., 1993; 张招崇和王福生, 2003), 又运用了迭代法 (Herzberg and O'Hara, 2002; Herzberg and Asimow, 2008), 可更简单、准确的反演岩浆的演化过程。此外, 本文以峨眉山大火成岩省丽江地区的苦橄岩为例, 详细阐述了该方法在约束原始岩浆成分和解释岩石成因方面的重要意义。

1 原理

当地幔源区经部分熔融形成原始岩浆后, 原始岩浆在上升过程以及在岩浆房中发生一系列的演化, 从而使岩浆的成分不断发生改变。当岩浆的分异作用只与橄榄石的结晶分异相关时, 可以采用加入橄榄石的方法来恢复原始岩浆的成分。由于橄榄石成分主要是由镁铁硅酸盐组成, 其它元素的质量均不足百分之一, 因此可以近似认为分异的橄榄石为纯的 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 。加入橄榄石的 F_o/F_a 值 [橄榄石的 F_o 值: $F_o = \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Mg}) + n(\text{Fe})}$; 橄榄石的 F_a 值: $F_a = \frac{n(\text{Fe})}{n(\text{Mg}) + n(\text{Fe})}$] 可以根据镁铁分配系数推导出来。相关的实验研究表明橄榄石和熔浆之间的镁铁分配系数比较固定, 一般在 0.30 ~ 0.36 之间, 其中随着压力的增加分配系数增大 (Takahashi and Kushiro, 1983; Jones, 1988; Herzberg, 1987; Ulmer, 1989; Bottinga, 1991; Kushiro and Walter, 1998; Toplis, 2005)。因此, 根据分配系数 (K_d) 定义有:

$$K_d = \frac{\frac{X(\text{Fe}, \text{Ol})}{X(\text{Mg}, \text{Ol})}}{\frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})}} \quad (1)$$

式中 $X(\text{Fe}, \text{Ol})$ 、 $X(\text{Mg}, \text{Ol})$ 分别为铁、镁在橄榄石中的含量 (以 mol 为单位), $X(\text{Fe}, \text{melt})$ 、 $X(\text{Mg}, \text{melt})$ 分别为铁、镁在熔体中的含量 (以 mol 为单位)。根据橄榄石分子式我们可以得出:

$$2X(\text{Si}, \text{Ol}) = [X(\text{Fe}, \text{Ol}) + X(\text{Mg}, \text{Ol})] \quad (2)$$

由(1)式可得:

$$\frac{X(\text{Fe}, \text{Ol})}{X(\text{Mg}, \text{Ol})} = K_d \cdot \frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})}$$

$$\text{即: } X(\text{Fe}, \text{Ol}) = K_d \frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})} \cdot X(\text{Mg}, \text{Ol}) \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式可得:

$$X(\text{Si}, \text{Ol}) =$$

$$2 \left[K_d \cdot \frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})} + 1 \right] \cdot X(\text{Mg}, \text{Ol}) \quad (4)$$

根据(3)和(4)可得:

$$X(\text{Fe}, \text{Ol}): X(\text{Mg}, \text{Ol}): X(\text{Si}, \text{Ol}) =$$

$$K_d \cdot \frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})}: 1:$$

$$0.5 \left[K_d \cdot \frac{X(\text{Fe}, \text{melt})}{X(\text{Mg}, \text{melt})} + 1 \right] \quad (5)$$

将物质的量比换算成质量比可得:

$$m(\text{FeO}, \text{Ol}): m(\text{MgO}, \text{Ol}): m(\text{SiO}_2, \text{Ol}) = \\ 71.85X(\text{Fe}, \text{Ol}): 40.31X(\text{Mg}, \text{Ol}): \\ 60.09X(\text{Si}, \text{Ol}) \quad (6)$$

于是, 可以计算出橄榄石中各氧化物组分质量百分含量:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega(\text{FeO}, \text{Ol}) &= \frac{m(\text{FeO}, \text{Ol})}{m(\text{FeO}, \text{Ol}) + m(\text{MgO}, \text{Ol}) + m(\text{SiO}_2, \text{Ol})} \\ \omega(\text{MgO}, \text{Ol}) &= \frac{m(\text{MgO}, \text{Ol})}{m(\text{FeO}, \text{Ol}) + m(\text{MgO}, \text{Ol}) + m(\text{SiO}_2, \text{Ol})} \\ \omega(\text{SiO}_2, \text{Ol}) &= \frac{m(\text{SiO}_2, \text{Ol})}{m(\text{FeO}, \text{Ol}) + m(\text{MgO}, \text{Ol}) + m(\text{SiO}_2, \text{Ol})} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

根据质量守恒定律可得:

$$\left\{ \begin{aligned} x \cdot \omega(\text{FeO}, \text{Ol}) + y \cdot \omega(\text{FeO}, \text{melt}) &= (x + y) \cdot \omega(\text{FeO}) \\ x \cdot \omega(\text{MgO}, \text{Ol}) + y \cdot \omega(\text{MgO}, \text{melt}) &= (x + y) \cdot \omega(\text{MgO}) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

其中 x 表示加入橄榄石的质量, y 表示熔体质量, $\omega(\text{FeO})$ 和 $\omega(\text{MgO})$ 表示加入橄榄石后新熔体的 FeO 和 MgO 的质量百分含量。

因为橄榄石在原始岩浆中的结晶分异是一个连续的过程, 首先结晶出来的橄榄石 F_o 值最高, 随着分异过程的不断进行, F_o 值不断降低, 直至橄榄石不再结晶为止。因此在熔体中的 MgO、FeO 质量百分含量已知, 且 K_d 确定的情况下, 使 $x: y$ 足够小 (本文按 1: 100 计算), 把式(5)、(6)、(7)代入(8)式, 并进行迭代计算, 就可以计算出熔体中 MgO—FeO 演化曲线 (见图 1)。通过计算, 如果假设电子探针分析数据 MgO、FeO 含量标准偏差 $\pm 0.011\%$ (1σ), 计算分配系数 K_d 的标准偏差为 ± 0.001 , 经过 28 次迭代计算得到的 MgO、FeO 含量会分别产生 $\pm 0.02\%$ 和 $\pm 0.039\%$ 的误差, 相对误差均远 $< 1\%$ 。

根据张招崇和王福生(2003)推导的橄榄石中 Fo 值与熔体达到平衡时,熔体中的 MgO、FeO 有如下关系:

$$\omega(\text{MgO, melt}) = 0.56095K_d \cdot \frac{\text{Fo}}{(1 - \text{Fo})} \cdot \omega(\text{FeO, melt}) \quad (9)$$

由(9)式可知,当 Fo 值确定时,熔体中对应平衡的 MgO、FeO 在 MgO—FeO 图解中呈线性相关(图 1)。直线与 MgO、FeO 演化曲线相交时,交点即可近似看作所求原始岩浆的 MgO、FeO 含量。

利用该图解(图 1)可以恢复原始岩浆成分,也可据此讨论岩浆的演化过程,具体方法如下:选取全岩的 MgO、FeO 含量投影在该图解上,投影点应落在一条 MgO—FeO 演化曲线上,选取 Fo 的最大值所对应的 MgO—FeO 直线(假设全岩 MgO 为 10%,FeO 为 13.4%,对应最大 Fo 值为 92),记直线与曲线的交点为 O(图 1),如果投影点刚好落在 O 点或者离 O 点非常近,则说明全岩成分可代表原始岩浆的成

分;如果投影点位于 O 点的左侧,则说明该全岩成分可能代表了演化的岩浆成分,在深部可能存在更基性的岩浆,其原始岩浆成分中 MgO、FeO 含量则可用 O 点的值表示,再通过质量平衡原理便可估计出原始岩浆成分;另外一种可能是该橄榄石为捕虏晶,如果是捕虏晶的话,则要重新选择橄榄石颗粒。因此,使用该图解前首先要判断该橄榄石是原始岩浆结晶的还是捕虏晶,具体判断方法见张招崇和王福生(2003)。如果投影点落在 O 点右侧,说明全岩成分有过剩的橄榄石加入,并可以计算出过剩橄榄石含量。

2 应用实例

在此利用张招崇等(2006)在峨眉山大火成岩省丽江地区发现的苦橄岩的地球化学数据,阐述该方法在估算本区原始岩浆成分方面的应用。表 1 为峨眉山大火成岩省云南丽江地区代表性样品的主要元素分析结果和部分橄榄石的电子探针分析结果。

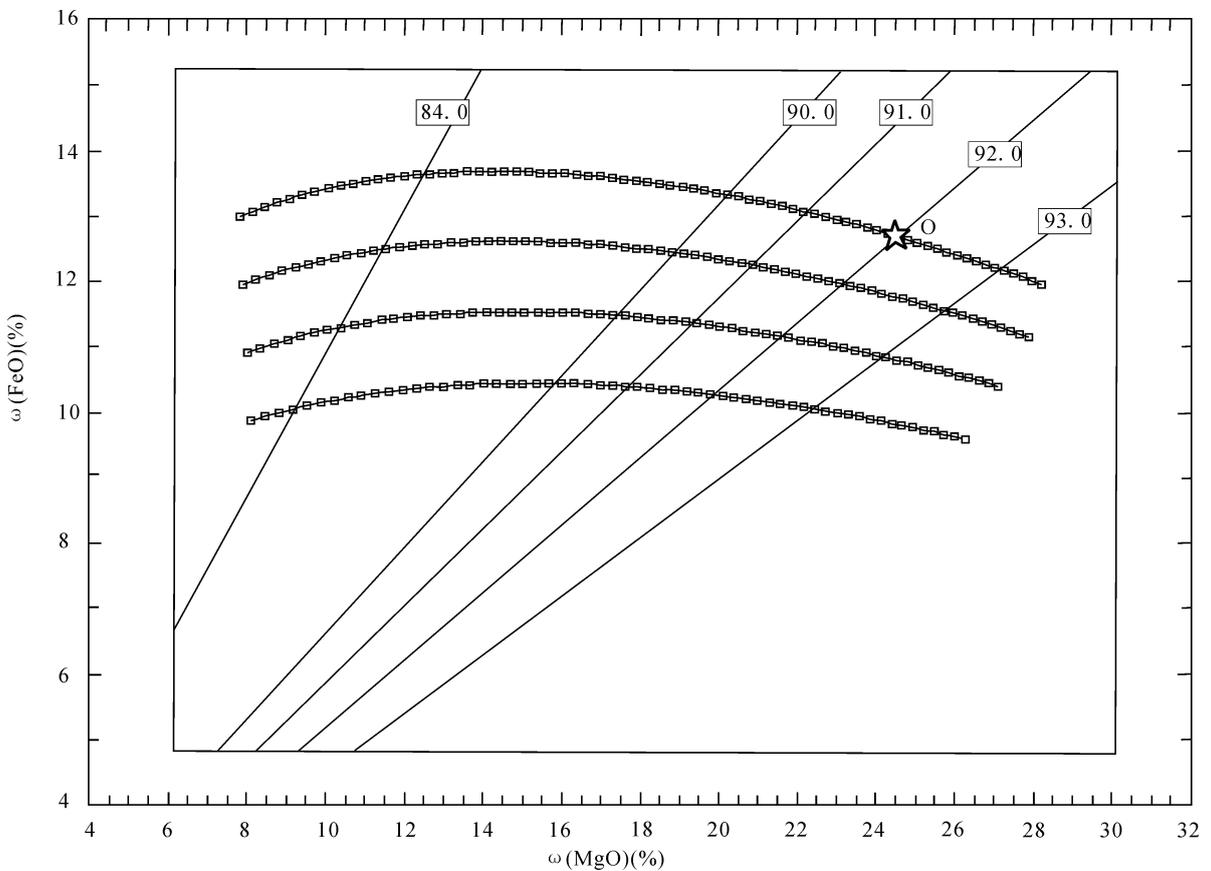


图 1 熔体在橄榄石分离结晶过程中 MgO、FeO 含量演化曲线

Fig. 1 MgO and FeO variations of the liquids evolution trends in fractional crystallization of olivine
 曲线代表 MgO、FeO 演化方向;直线代表平衡状态下分离结晶出的橄榄石 Fo 值;交点表示熔体与橄榄石达到平衡状态
 The curves represent evolution trends of MgO and FeO contents; the straight lines represent Fo contents of olivine
 in equilibrium with liquids; their crossing points represent the states of liquids in equilibrium of olivine

有关峨眉山大火成岩省的地质情况已有详细叙述(Ali et al., 2005; Xu et al., 2001),在此不再赘述。丽江地区苦橄岩发现于丽江市南北的仕满和大具剖面,岩体地质特征见张招崇等(2003, 2004, 2006)。苦橄岩中的斑晶主要为富镁橄榄石,其 F_o 值仕满最高达 91.6%, 大具最高达 91.1%, CaO 含

量最高达 0.42%, 其内含有少量玻璃包裹体(张招崇等, 2006; Hanski et al., 2010), 指示橄榄石是在熔体中结晶形成的。由于该地区橄榄石不以巨晶的形式出现, 所以推测是在低压条件下结晶的。Toplis (2005) 给出了镁铁分配系数的数学公式:

$$K_d(Mg-Fe, Ol-melt) = \exp\left\{\left(\frac{-6766}{RT} - \frac{7.34}{R}\right) + \ln[3.6X(SiO_2, melt) - 0.22] + \frac{3000(1-2X_{Fo})}{RT} + \frac{0.035(P-1)}{RT}\right\} \quad (10)$$

其中 R 表示气体常数, T 表示绝对温度, $X(SiO_2, melt)$ 表示熔体中硅酸盐摩尔分数, X_{Fo} 表示 $n(Mg)/[n(Mg) + n(Fe)]$ 。在 0.1 MPa 下分配系数可近似等于 0.3。所以将该地区橄榄石熔体的镁铁分配系数看作常数 0.3。然而并不是所有岩石化学成分都可以用来恢复原始岩浆, 只发生橄榄石分离结晶的岩浆的岩石化学成分才可用于恢复原始岩浆。Herzberg and Asimow (2008) 研究了橄榄岩/辉石源

区 CaO 的演化特征, 结果表明如果 CaO 满足以下不等式条件:

$$\begin{cases} \omega(CaO) > 13.81 - 0.274\omega(MgO) \\ \omega(CaO) < 2.318\omega(SiO_2) - 93.626 \end{cases} \quad (11)$$

说明在岩浆的演化过程中, 只有橄榄石的分离结晶, 而没有其它矿物的分离结晶。

对仕满和大具地区数据(张招崇等, 2006; Hanski et al., 2010) 用上面的不等式进行筛选, 其中 7 个样品可用于恢复原始岩浆成分(表 1), 分别是 DJ-3、DJ-14、DJ-25、DJ-35、SM-14、SM-15 和 7-EJH-06。

表 1 峨眉山大火成岩省丽江地区用来估算原始岩浆成分的岩石样品主要元素成分电子探针成分分析结果

Table 1 Microprobe analyses of major element compositions of the samples from the Lijiang area of Emeishan large igneous province

样品号	DJ-3	DJ-14	DJ-25	DJ-35	SM-14	SM-15	7-EJH-06
产地	大具	大具	大具	大具	仕满	仕满	大具
名称	苦橄岩	玄武岩	玄武岩	苦橄岩	苦橄岩	苦橄岩	玄武岩
SiO_2	48.74	49.63	49.08	48.44	45.64	46.15	45.72
TiO_2	2.12	1.99	2.21	2.10	1.73	1.57	2.04
Al_2O_3	9.15	11.34	10.4	9.97	8.12	8.15	11.35
FeO	11.63	11.42	11.69	14.02	12.94	12.70	11.241
MnO	0.15	0.17	0.16	0.18	0.2	0.18	0.2
MgO	15.58	10.16	12.25	13.02	22.44	23.01	11.24
CaO	10.56	11.68	12.03	10.85	7.85	7.75	10.73
Na_2O	2.01	2.19	1.50	1.13	0.85	0.52	1.93
K_2O	0.14	1.07	0.82	0.50	0.20	0.22	1.44
P_2O_5	0.21	0.19	0.28	0.24	0.18	0.16	0.29
烧失	4.58	2.09	4.74	4.07	5.47	4.62	2.32
总量	100.29	99.84	100.42	100.44	100.15	100.41	98.5
$Mg^{\#}$	70.5	61.3	65.1	62.3	75.6	76.4	64.0
①	9.54	11.03	10.45	10.24	7.66	7.51	10.73
②	19.35	21.42	20.14	18.66	12.17	13.35	12.35

注: 数据来源于张招崇等(2006)和 Hanski et al. (2010); ①: $13.81 - 0.274\omega(MgO)$; ②: $2.318\omega(SiO_2) - 93.626$; 。

将样品的 MgO 、 FeO 值投于 $MgO-FeO$ 图解中, 仕满和大具地区苦橄岩和玄武岩的橄榄石 F_o 最高值分别为 91.6 和 91.1 (图 2), 用该值恢复两地区的原始岩浆, 从图 2 可以看出 SM-14 和 SM-15 非常接近原始岩浆并且落在一条演化曲线上, 估算出 MgO 、 FeO 含量分别为 23.5% 和 12.8%, 因此可以认为这两个样品是经过原始岩浆轻度分异产生的岩浆, 而 SM-15 更接近原始岩浆成分, 这与张招崇和王福生(2003)结论一致, 苦橄岩 SM-15 的成分基本可以代表原始岩浆成分; 样品 DJ-3、DJ-14、DJ-25 和 7-EJH-06 落在了另外一条曲线上, 估算出的原始岩浆成分 MgO 、 FeO 含量分别为 19.8% 和 11.3%, 4 个样品的投点距离估算的原始岩浆成分较远, 因此它们代表的是原始岩浆演化的结果; 值得注意的是由 DJ-35 估算的原始岩浆成分 MgO 、 FeO 含量分别为 23% 和 13.3%, 与 SM-14 和 SM-15 的成分比较接近, 说明大具很可能还存在另一种与仕满类似的原始岩浆。

利用 Iwamori et al. (1995) 提出的根据

MgO 含量计算原始岩浆温度的公式:

$$t_p(^\circ\text{C}) = 1463 + 1274\omega(\text{MgO}) - \frac{29.24}{\omega(\text{MgO})}$$

计算出的大具与仕满的 t_p 分别为 1585°C 和 1638°C, 如上所述, MgO 计算误差很小, 即使假设 MgO 计算误差为 $\pm 0.2\%$, 计算出的 t_p 误差为 $\pm 25.4^\circ\text{C}$ 。这与 He et al. (2010) 利用 Herzberg and Asimow(2008) 设计的 PRIMELT2 程序计算出的 DJ-25 和 SM-15 的地幔潜温 1582°C 和 1627°C 结果一致, 说明该方法的合理性。He et al. (2010) 和张招崇等(2004, 2006) 认为丽江为峨眉山大火成岩省地幔柱的中心, 结合计算出的地幔潜温高出地幔平均温度(1300°C ~ 1400°C) 约 300°C, 表明确实具备地幔柱中心的热源条件。大具与仕满两地的温度差异以及估算出原始岩浆的 MgO 含量的不同说明它们熔融程度的不同 (Niu and Batiza, 1991; Niu, 1997; Langmuir, 1989;

Langmuir et al., 1992), 仕满地区的原始岩浆熔融程度更高, 而大具则比仕满熔融程度低一些。这一点也可以从 Na_2O 含量上得到验证, 因为在地幔发生部分熔融时 Na 可以看作不相容元素 (Langmuir et al., 1992), 因此, Na_2O 含量越高说明部分熔融程度越低, 我们将大具的 4 个样品恢复到原始岩浆成分后, Na_2O 含量依旧在 1.3% ~ 1.5% 之间, 比 SM-14 和 SM-15 样品中 Na_2O 含量 0.85% 和 0.52% 高。图 2 显示由 DJ-35 估算出的原始岩浆成分和 SM-14、SM-15 的 MgO、FeO 含量接近, 而与大具其它 4 个样品估算出的原始岩浆 MgO、FeO 含量差别较大, Na_2O 含量也与 SM-14、SM-15 接近, 说明大具地区除了由 DJ-3、DJ-14、DJ-25 和 7-EJH-06 估算出的部分熔融程度较低的原始岩浆, 还存在着类似于仕满原始岩浆的相对较高部分熔融形成的原始岩浆。仕满地

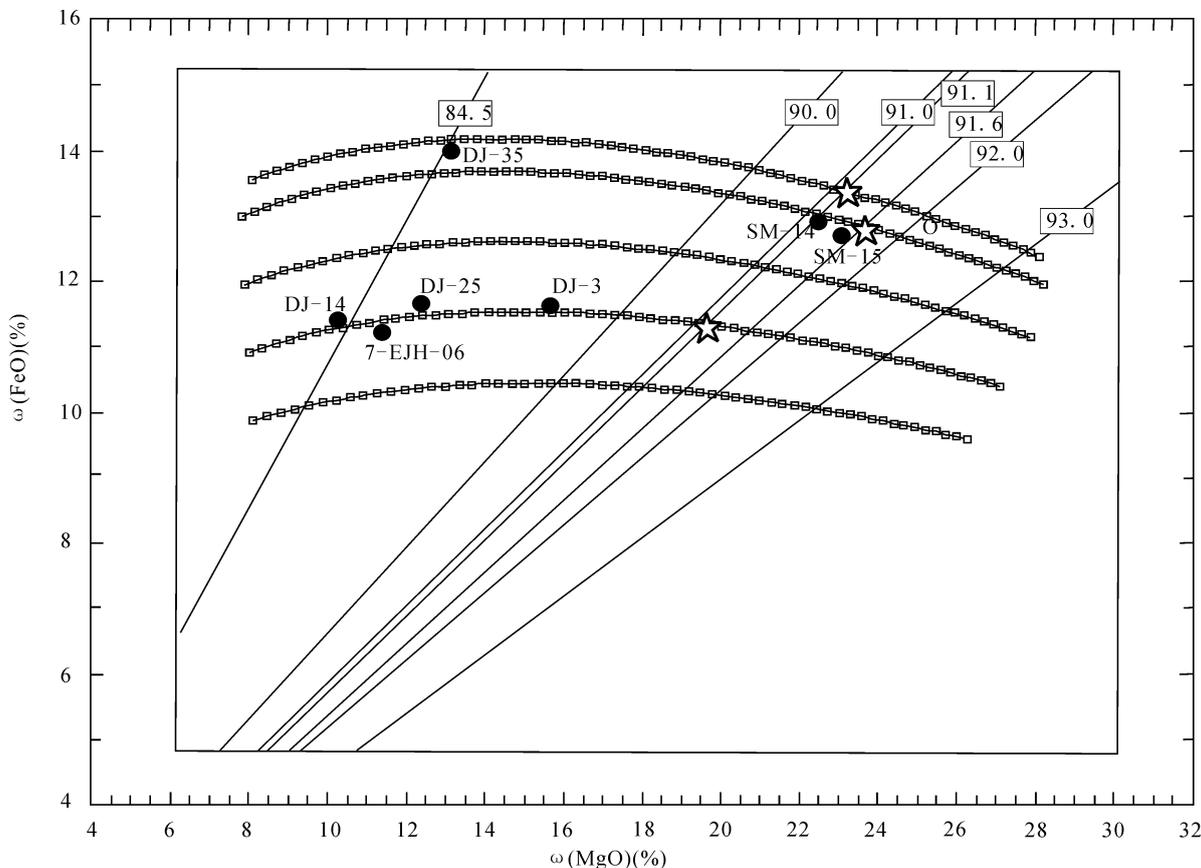


图 2 峨眉山大火成岩省熔体在橄榄石分离结晶过程中 MgO、FeO 含量演化曲线

Fig. 2 MgO and FeO variations of liquids evolution trends in fractional crystallization of olivine from the Lijiang area of Emeishan large igneous province

曲线代表 MgO、FeO 演化方向。直线代表平衡状态下分离结晶出的橄榄石 Fo 值, 交点表示熔体与橄榄石达到平衡状态, 黑色圆点代表峨眉山大火成岩省岩石样品 (张招崇等, 2006; Hanski et al., 2010), 五角星代表原始岩浆成分

The curves represent evolution trends of MgO and FeO contents. The straight lines represent Fo contents of olivine in equilibrium with liquids. Their crossing points represent the states of liquids in equilibrium of olivine. Black points represent the samples of Emeishan large igneous province (Zhang Zhaochong et al., 2006; Hanski et al., 2010). Stars represent primitive magmas

区样品 SM-14 和 SM-15 的演化程度很低,可能没有或很少在岩浆房中发生橄榄石的分离结晶作用,基本可以代表地幔部分熔融后直接喷发的原始岩浆成分。而大具地区的样品不管是 DJ-35 还是 DJ-3、DJ-14、DJ-25 和 7-EJH-06 演化程度都明显较高,代表了原始岩浆在岩浆房中发生了较长时间的橄榄石分离结晶作用的结果。

峨眉山大火成岩省中占绝大多数的溢流玄武岩的 $\omega(\text{MgO})$ 一般较低,多数 $< 8\%$, 并且 $\omega(\text{CaO})$ 含量不满足上述两个不等式(11),说明这些岩石不可能由原始岩浆通过单一的橄榄石分离结晶作用直接形成,因为 $\omega(\text{MgO}) < 8\%$ 的玄武岩的形成与单斜辉石和斜长石的分离结晶以及同化混染有关。这一点从溢流玄武岩的斑晶主要为单斜辉石和斜长石就可以得到证明,暗示分离结晶矿物可能主要为单斜辉石和斜长石,橄榄石不是主要的分离结晶相。另外,该方法的适用范围是在橄榄石为主要分离结晶相的岩浆演化过程中,因为在岩浆演化过程中除了分离结晶作用,可能还存在同化混染作用,所以在地球化学特征或岩相学特征表明演化过程中存在同化混染作用时,不能直接用该方法来恢复原始岩浆以及判别分离结晶程度。

3 结论

基于橄榄石的质量平衡原理、橄榄石和熔浆的铁镁分配系数以及迭代算法,提出了一种新的约束橄榄石分离结晶系列原始岩浆成分的 $\text{MgO}-\text{FeO}$ 演化图解。根据火山岩中橄榄石的 Fo 值及其寄主岩石的全岩成分,可以简单、直观的判别原始岩浆成分,进而深入的探讨原始岩浆的演化过程。应用该方法本文对峨眉山大火成岩省丽江地区的大具与仕满地区剖面发现的苦橄岩进行了系统的研究,结果表明:

(1) 由样品 SM-14 和 SM-15 计算出的仕满地区原始岩浆 MgO 、 FeO 含量分别为 23.5% 和 12.8%, 熔融程度较高。SM-14 和 SM-15 是由仕满原始岩浆经过轻度橄榄石分离结晶形成的,基本可以代表原始岩浆成分。

(2) 由大具地区样品计算出的原始岩浆 MgO 、 FeO 含量分别为 19.8%、11.3% 和 23%、13.3%, 一类部分熔融程度相对较低,另一类部分熔融程度相对较高;熔融程度较高的原始岩浆成分与仕满原始岩浆类似。大具地区的岩石样品成分均不能代表该地区的原始岩浆成分,而是经历了明显的橄榄石分

离结晶作用。

(3) 峨眉山大火成岩省中绝大多数的玄武岩中 CaO 不符合橄榄石分离结晶关系,表明这些玄武岩不可能由原始岩浆通过橄榄石分离结晶作用直接形成。

致谢: 徐义刚研究员审阅文稿并提出了许多建设性意见,提高了文稿的质量,作者在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献 / References

- 张招崇,王福生. 2003. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例. 吉林大学学报(地球科学版), 33: 130 ~ 134.
- 张招崇,郝艳丽,王福生. 2003. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义. 地质学前沿, 10: 105 ~ 114.
- 张招崇,王福生,郝艳丽. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束. 地质学报, 78(2): 171 ~ 180.
- 张招崇, John J M, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据. 岩石学报, 22(6): 1538 ~ 1552.
- Ali J R, Thompson G M, Zhou M F and Song X Y. 2005. Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 79: 475 ~ 489.
- Asimow P D and Longhi J. 2004. The significance of multiple saturation points in the context of polybaric near fractional melting. *Journal of Petrology*, 45: 2349 ~ 2367.
- Bottinga Y. 1991. Thermodynamic properties of silicate liquids at high pressures and their bearing on igneous petrology. In: Perchuk L L and Kushiro I. eds. *Physical chemistry of magmas*. Berlin: Springer, 213 ~ 232.
- Hanson G N and Langmuir C H. 1978. Modelling of major elements in mantle—melt systems using trace element approaches. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 725 ~ 741.
- Hanski E, Kamenetsky V S, Luo Zhenyu, Xu Yigang and Kuzmin D. 2010. Primitive magmas in the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China and northern Vietnam. *Lithos*, 119: 75 ~ 90.
- Hauri E. 1996. Major-element variability in the Hawaiian mantle plume. *Nature*, 382: 415 ~ 419.
- He Qi, Xiao Long, Balta B, Gao Rui and Chen Jianye. 2010. Variety and complexity of the Late-Permian Emeishan basalts: Reappraisal of plume-lithosphere interaction processes. *Lithos*, 119: 91 ~ 107.
- Herzberg C. 1987. High-pressure melting studies. *Nature*, 328: 472.
- Herzberg C and Asimow P D. 2008. Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2. XLS software for primary magma calculation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, doi: 10.1029/2008GC002057.
- Herzberg C and OHara M J. 2002. Plume-associated ultramafic magmas of Phanerozoic age. *Journal of Petrology*, 43: 1857 ~ 1883.
- Iwamori H, McKenzie D and Takahashi E. 1995. Melt generation by isentropic mantle upwelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 134: 253 ~ 266.
- Jones J H. 1988. Partitioning of Mg and Fe between olivine and liquids of lunar compositions: The roles of composition, pressure and Ti speciation. *Lunar and Planetary Science Conference*, 19: 561 ~ 562.
- Kushiro I and Walter M J. 1998. Mg—Fe partitioning between olivine

- and mafic—ultramafic melts. *Geophysical Research Letters*, 25: 2337 ~ 2340.
- Koch-Müller M, Cemic L and Langer K. 1992. Experimental and thermodynamic study of Fe—Mg exchange between olivine and orthopyroxene in the system MgO—FeO—SiO₂. *European Journal of Mineralogy*, 4: 115 ~ 135.
- Langmuir C H. 1989. Geochemical consequences of in situ crystallization. *Nature*, 340: 199 ~ 205.
- Langmuir C H, Klein E M and Plank T. 1992. Petrological systematics of Mid-ocean ridge basalts; Constraints on melt generation beneath ocean ridge. in: Morgan J P, Blackman D K and Sinton J M. eds. *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. AGU Monograph, Washington, D. C., 71: 183 ~ 280.
- Larsen L M and Pedersen A K. 2000. Processes in high-Mg, high-T magmas; evidence from olivine, chromite and glass in Palaeogene picrites from West Greenland. *Journal of Petrology*, 41: 1071 ~ 1098.
- Niu Yaoling and Batiza R. 1991. An empirical method for calculating melt compositions produced beneath mid-ocean ridges; application for axis and off-axis (seamounts) melting. *Journal of Geophysical Research*, 96: 21753 ~ 21777.
- Niu Yaoling. 1997. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges; Evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology*, 38: 1047 ~ 1074.
- Toplis M J. 2005. The thermodynamics of iron and magnesium partitioning between olivine and liquid; criteria for assessing and predicting equilibrium in natural and experimental systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149: 22 ~ 39
- Nisbet E G, Cheadle M J, Arndt N T and Bickle M J. 1993. Constraining the potential temperature of the Archaean mantle; a review of the evidence from komatiites. *Lithos*, 30: 291 ~ 307.
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olivine—liquid equilibrium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29: 275 ~ 289.
- Takahashi E and Kushiro I. 1983. Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis. *American Mineralogist*, 68: 859 ~ 879.
- Thompson R N and Gibson S A. 2000. Transient high temperatures in mantle plume heads inferred from magnesian olivines in Phanerozoic picrites. *Nature*, 407: 502 ~ 506.
- Ulmer P. 1989. The dependence of Fe²⁺—Mg cation — partitioning between olivine and basaltic liquid on pressure, temperature and composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101: 261 ~ 273.
- Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B and Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145 ~ 168.

An Improved Simple Method for Estimating Primitive Magma

—— a Case for the Picrites in the Lijiang Area of Emeishan Large Igneous Province

LI Yongsheng¹⁾, ZHANG Zhaochong¹⁾, NIE Baofeng²⁾

1) *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

2) *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, 100048*

Abstract: Based on Fe—Mg distribution coefficient between olivine and melt, the MgO—FeO evolution diagram is built. The compositions of primary magmas can be estimated by the intersection point of straight line and curve which illustrates liquids in equilibrium with olivine. It is suitable for the system of olivine fractional crystallization, and its advantage is that it can be easily and visually used. It is also pointed out how the diagram is applied. To show how to recover the composition of primitive magma and to explain the petrogenesis, the samples from the Lijiang area of Emeishan large igneous province are taken for examples. Results show that composition for the MgO and FeO contents of Shiman primitive magma are 23.5% and 12.8% respectively, with larger melting fraction. Samples SM-14 and SM-15 are resulted from low olivine fractional crystallization, so their contents could approximately represent primitive magma of Shiman area. Daju primitive magma may be divided two types. One has 19.8% MgO and 11.3% FeO contents, with lower melting fraction. The other one has 23% MgO and 13.3% FeO contents similar to the Shiman, with larger melting fraction. Samples from the Daju all experienced large olivine fractional crystallization. Most basalts from the Emeishan large igneous province have MgO contents less than 8%, and include many clinopyroxene and plagioclase phenocrysts, suggesting that these basalts can not be directly resulted from olivine fractional crystallization of Emeishan primitive magma.

Key words: primitive magma; distribution coefficient; mass balance; Emeishan large igneous province