

# 论南京娘娘山碱性岩浆房的梯度及其成因机制

陶奎元 薛怀民

(南京地质矿产研究所)

**主题词:** 岩浆房; 成分梯度; 分离结晶; 热重力效应; 南京娘娘山

**提 要:** 本文详细研究了娘娘山碱性火山杂岩体中矿物斑晶和化学成分的变化情况,发现它们定位前在岩浆房中就存在着物质成分的梯度和分带性。提出并论证矿物的分离结晶是该岩浆房中梯度形成的主要机制,但由对流所控制的热重力扩散作用对岩浆房中成分梯度的形成也具有一定的影响。

近代火山岩微量元素地球化学的研究,特别对火山岩地层(时序)—体积(喷发量)—物质成分之间关系的深入研究,证实硅质和中性岩浆房中存在着梯度和分带性,从而揭示了高层位岩浆分异的历史和机制。当代岩石学家普遍认为岩浆房梯度及其成因机制的研究是岩石学中的前缘课题。作者在研究娘娘山碱性火山杂岩地质学的基础上<sup>[1,2]</sup>,进一步对矿物地球化学作了专门性研究,证实碱性岩浆房中具有明显的成分梯度和分带性,而矿物的分离结晶作用是这种梯度和分带性形成的主要机制。

## 一、碱性火山杂岩的同源性与岩浆房的温度、压力条件

### 1. 碱性火山杂岩同源性的证据

杂岩体在时间上属同一火山活动旋回的产物 娘娘山碱性火山杂岩是宁芜火山构造洼地中生代火山活动末期,继大规模安山—粗安质岩石发育的一套富碱的岩石组合。杂岩体内各类岩石的形成时间稍有先后,约在105—110Ma范围内<sup>[1]</sup>的早白垩纪末。

杂岩体在空间上构成一中等规模的爆发—塌陷型破火山口 娘娘山碱性火山杂岩体包括火山活动的两个亚旋回所形成的产物,但层状火山岩在剖面上均向古火山口的中心倾斜,而平面上则呈半环状或环状围绕古火山口展布。次火山岩受破火山口内发育的环状和放射状断裂控制,集中分布于碱性火山杂岩体的外带(亦即古火山口的边缘地带)。侵入岩受火山管道控制,呈岩筒状产出。它系碱性火山活动末期、破火山口形成之后,残留于岩浆房更深部位的岩浆沿火山通道上侵形成的。

杂岩体地球化学特征的一致性 娘娘山碱性火山活动分为两个亚旋回,不同亚旋回的产物在岩石学、岩石化学和地球化学上虽具明显差异如:早期岩石以含富钾矿物白榴石(现已转变为假白榴石)为特征,岩石中钾的含量较高, $K_2O/Na_2O$  3.5—5.5;而晚期岩石(第二亚

旋回)则以含富钾矿物蓝方石<sup>(3)</sup>①为特征,全岩钾的含量相对降低而钠的含量升高, $K_2O/Na_2O = 1.5 \pm$ 。但两个亚旋回的产物均以富钾( $K_2O/Na_2O > 1$ )、轻稀土元素以及其它不相容元素为特征,显示其总的地球化学特征的一致性。

## 2. 岩浆房中的物理化学条件

**岩浆房体积的估计** 娘娘山破火山口平面上呈一椭圆形,直径 $5 \times 2 - 3$  km,整个破火山口的面积约 $12 \text{ km}^2$ ,其中火山岩的厚度约 $800 \sim 1000$  m,喷出物的体积约 $10 \text{ km}^3$ 。考虑到通常情况下岩浆的喷发量仅是岩浆房实际体积的 $1/10$ 左右,所以估计娘娘山碱性岩浆房的体积约 $100 \text{ km}^3$ ,为一个中等规模的岩浆房。

**岩浆房中温度、压力条件的估计** Smith (1979)<sup>(4)</sup> 曾讨论过火山灰流喷发的体

积、破火山口面积以及岩浆房深度三者之间的关系,根据他所提供的图解估计,娘娘山碱性岩浆房的埋深约 $1 \text{ km}$ 。由于岩浆喷发及其产物在流动过程中有大量的细小火山灰飘扬到空气中,因而现在所得到的喷发物体积仅是实际喷发量的最小值,所以估计的岩浆房深度也只是个最小值。另一方面,根据图1中各成分点投影的分布情况可看出当时岩浆房内的压力约 $0.5 \times 10^8 - 10^8 \text{ Pa}$ ,即相当于 $2 - 3 \text{ km}$ 深度,而温度则在 $1000 - 1160^\circ \text{C}$ 左右。此外,岩石中普遍出现高温低压相矿物白榴石(现已转变为假白榴石)斑晶,

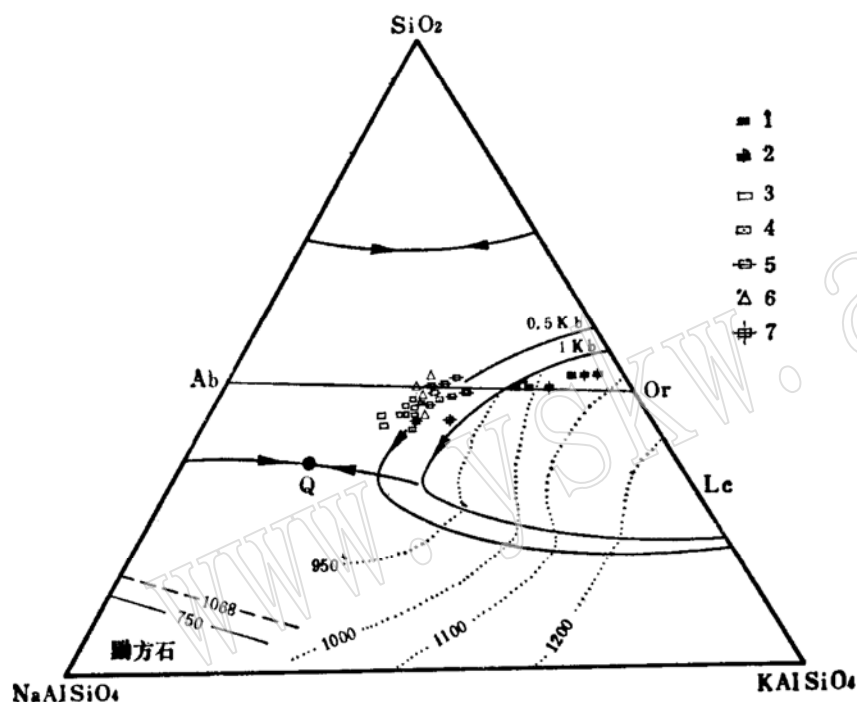


图1 娘娘山碱性火山杂岩体的石英—霞石—钾霞石图解

Fig. 1 Phase diagram of the system  $\text{SiO}_2 - \text{NaAlSiO}_4 - \text{KAlSiO}_4$  for Niangniangshan alkaline volcanic complex

1—假白榴石响岩; 2—假白榴石斑岩; 3—蓝方石响岩; 4—蓝方石响岩质熔结凝灰岩; 5—蓝方石响岩质熔结角砾岩中的浆屑; 6—蓝方石粗面斑岩; 7—蓝方霓辉正长岩  
(图中数据是压力为 $1 \text{ kb} = 10^8 \text{ Pa}$ 时的温标)

也说明该岩浆房的温度较高,埋深较浅。

## 二、成分随时间变化揭示岩浆房梯度的特征

近几年的研究成果已充分说明,大陆地壳浅部大体积( $10^2 - 10^4 \text{ km}^3$ )的硅质岩浆房中,当其主要还处于液相时,就可形成明显的成分梯度<sup>(5)</sup>。这些岩浆房的顶部富集强不相容

① 薛怀民, 1987, 硕士论文, 中国地质科学院研究生部。

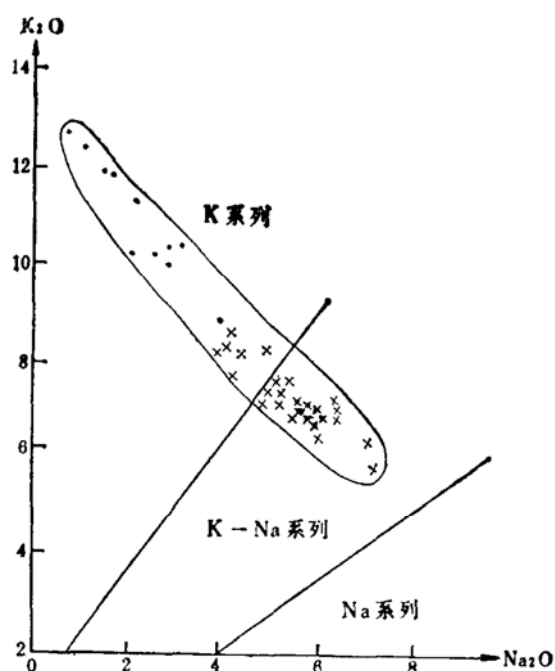
表 1 娘娘山碱性火山杂岩体中主要元素和微量元素丰度

Table 1 Major and minor element compositions of Niangniangshan volcanic complex

亚旋回	第 一 亚 旋 回						第 二 亚 旋 回				
分析号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样品号	NO1A	R225-1	NO21	N-4-5	N-5-1	N-6-1	N-7-1	NO44	N-1-1	N-8-1	N-5-2
SiO <sub>2</sub>	58.18	58.27	59.08	56.19	51.71	51.66	60.22	60.38	60.17	60.03	51.21
TiO <sub>2</sub>	0.37	0.34	0.38	0.31	0.90	0.98	0.42	0.43	0.44	0.45	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.23	22.59	22.10	22.00	18.25	17.79	18.92	19.06	18.81	18.90	17.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.73	2.81	2.24	3.23	3.95	4.90	1.60	1.49	1.74	1.79	3.79
FeO	0.54	0.35	0.41	0.16	2.68	2.04	0.68	1.38	1.15	1.20	2.82
MnO	0.07	0.12	0.13	0.07	0.18	0.16	0.08	0.12	0.10	0.13	0.13
MgO	0.70	0.67	0.40	0.60	2.05	2.60	0.48	0.55	0.65	0.73	2.11
CaO	0.05	0.70	0.39	1.43	6.18	5.96	1.86	1.96	2.11	2.29	5.84
Na <sub>2</sub> O	2.07	3.77	3.95	3.37	4.22	4.28	5.17	6.32	6.36	5.43	3.54
K <sub>2</sub> O	11.29	8.06	8.66	8.87	5.91	5.36	7.25	7.24	6.93	6.38	5.93
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.08	0.10	0.13	0.49	0.54	0.09	0.10	0.11	0.14	0.56
CO <sub>2</sub>			0.04	1.10	0.62	1.16	1.74		0.14	0.14	0.92
H <sub>2</sub> O	1.73	1.86	1.61	2.32	2.89	2.23	0.72		0.41	1.04	2.58
S	0.00	0.05		0.02	0.05	0.02	0.02		0.05	0.01	0.30
	99.97	99.58	99.49	100.67	100.03	99.70	99.58	99.75	99.13	99.16	98.98
K <sub>2</sub> O											
Na <sub>2</sub> O	5.45	2.14	2.19	2.63	1.40	1.25	1.40	1.15	1.09	1.27	1.68
Sc				1.23	4.93	6.34	1.37		1.53	1.60	7.43
V	75			100	75				104	88	100
Cr				25	0	15	0		0	15	10
Co				36	50	42	44		38	32	40
Ni				14	22	36	22		22	16	22
Zr				497.6	294.7	295.3	487.1		430.5	320.8	5.0
Y				23	45.5	40.6	33.7		32.8	31.7	32.7
Sr				307.7	2546	2092	400.8		456.2	994.1	7396
Nb				9.45	10.13	10.8	10.8		10.8	10.8	13.5
Ta				12.40	9.96	9.96	13.23		4.98	4.96	11.62
Rb				875.1	1424	1754	296.0		476.1	559.5	1324
Rb				274.6	132.8	132.2	157.8		154.6	132.8	144.7
U				5.4			10.5		10.0	6.4	
Th				29			27		19	17	
La				95.7	161	130	119		111	105	101
Ce				185	330	288	253		240	232	215
Pr				18.7	37.4	33.7	27.6		26.9	26.4	24.1
Nd				67.9	154	141	108		105	106	101
Sm				11.4	27.8	26.0	18.8		18.4	18.7	18.9
Eu				3.22	7.2	6.78	4.03		4.12	4.51	5.27
Gd				8.24	19.7	18.5	12.9		12.5	12.8	14.2
Tb				1.07	2.43	2.32	1.24		1.62	1.63	1.84
Dy				5.09	10.9	9.92	7.77		7.55	7.51	7.81
Ho				1.22	2.52	2.25	2.27		1.75	1.70	2.24
Er				2.05	4.15	3.76	3.29		3.10	2.98	3.11
Yb				1.83	3.10	2.70	2.62		2.52	2.31	2.33
Lu				0.28	0.45	0.40	0.40		0.37	0.34	0.35

注：表内样品的排列顺序同时代表其形成的先后顺序。

1—假白榴石玻质响岩； 2—假白榴石响岩； 3—含方钠石假白榴石响岩； 4—假白榴石斑岩； 5—假白榴石粗玄岩； 6—黑云母粗玄岩； 7—蓝方石响岩质熔结角砾岩中的浆屑； 8—蓝方石响岩质熔结凝灰岩； 9—蓝方石响岩； 10—蓝方石粗面斑岩； 11—蓝方辉正长岩。

图2  $K_2O$ 与 $Na_2O$ 的关系图Fig. 2 The diagram of  $K_2O$  and  $Na_2O$ 

•—第一亚旋回的产物, ×—第二亚旋回的产物

无论是喷出岩、次火山岩还是中央侵入体,其稀土元素球粒陨石标准化曲线的形式相似,均呈强烈的右倾型,各曲线之间呈近于平行的关系,表明这些岩石的同源性。同时,随着火山活动的进行,其产物中稀土元素含量逐渐降低(其中以轻稀土元素含量下降的幅度较大),说明稀土元素(尤其是轻稀土元素)在岩浆房中是向顶部富集部的。

## 2. 岩浆房中元素的富集特征

由于不同元素在岩浆房中的行为不尽相同,有些元素倾向于富集到岩浆房的顶部,而另一些元素则有向底部富集的趋势,因而不同元素在岩浆房中具有不同的梯度特征。为便于讨论,这里采用了“富集系数”这个术语。图4a表示第一亚旋回岩浆喷发时一些主要元素的梯度特征,图中所表示的富集系数是这些元素在玻质

元素,成分梯度的变化范围可从流纹质到安山质,而微量元素的梯度较主要元素更陡。近来在碱性岩浆房中类似的成分梯度特征也陆续见有报导<sup>[6,7,8]</sup>。

### 1. 化学成分随时间的变化情况

表1表明,娘娘山碱性火山作用产物其化学成分随时间的变化而变化。由图2也可看出,随着火山作用从早到晚,喷发产物中钾的含量不断降低而钠的含量不断升高,二者连续变化并互为消长关系,说明岩浆房内钾向顶部富集而钠向下部富集。与之相对应,喷出产物中的硅也由过饱和(图1中Ab—Or线以上)连续过渡到硅不饱和(Ab—Or线以下),说明硅也是在岩浆房的顶部富集。

与主要元素一样,微量元素含量也随时间的变化而呈规律性变化。图3中可以看出

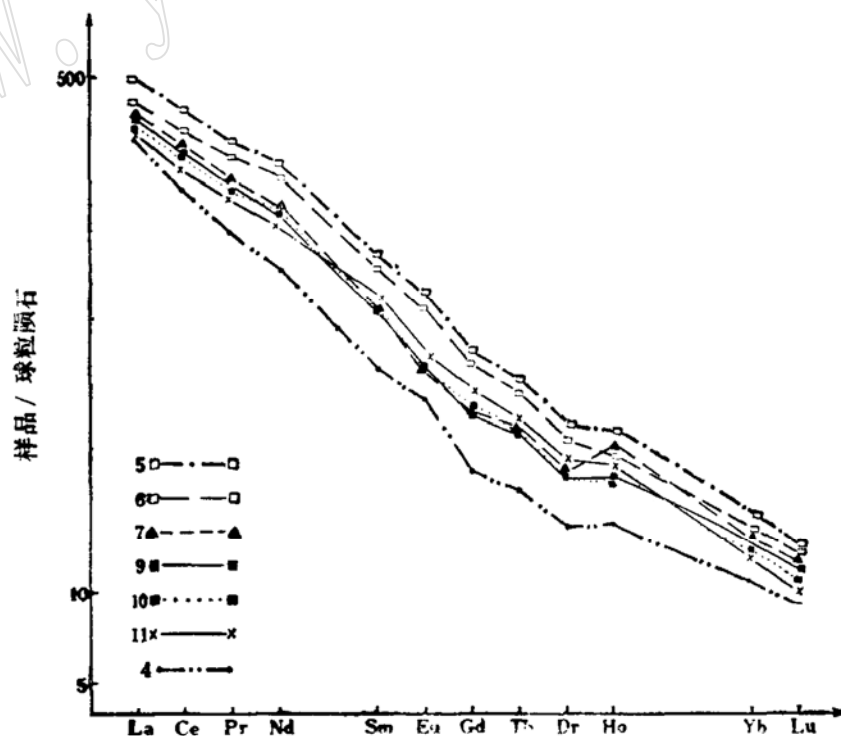


图3 娘娘山碱性岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线  
Fig. 3 REE patterns of Niangniangshan alkaline rocks

图中样号含意同表1

响岩(代表岩浆房顶部富含挥发份的“外壳”)中元素的含量与该亚旋回末期的喷溢物——黑云母粗玄岩中同种元素的含量比。图4b则表示第二亚旋回岩浆喷发时岩浆房中的梯度特征,从图中可以看出:

(1) 挥发分 F、H<sub>2</sub>O 在顶部富集而 Cl 在底部富集,这可能与蓝方石等含 Cl 矿物的结晶沉降有关。

(2) 与其它稀土元素在岩浆房顶部富集的情况相反, Eu 在底部富集,这可

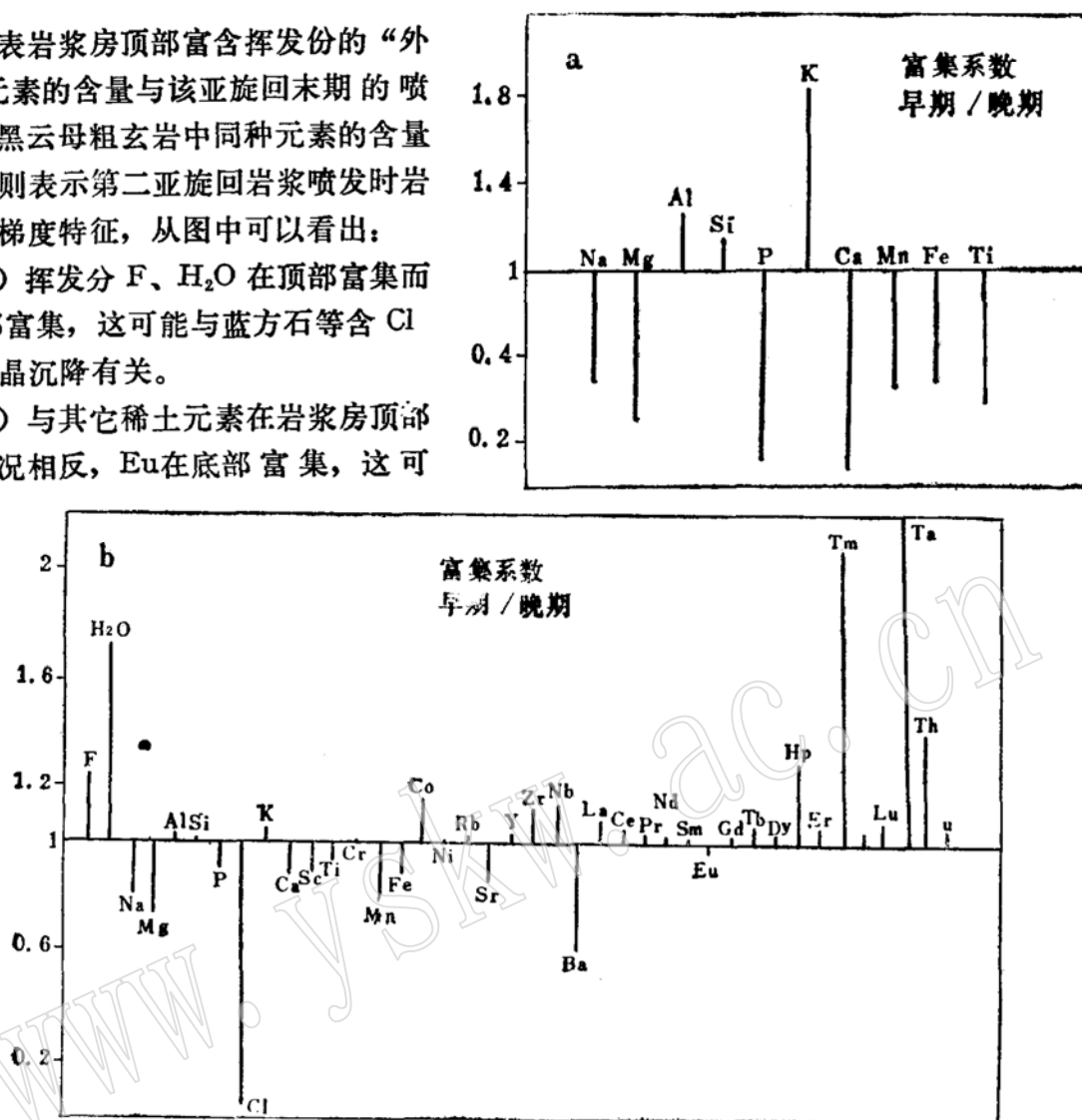


图 4 娘娘山碱性岩浆房中元素的富集系数

Fig. 4 Enrichment factors of elements in Niangniangshan alkaline magma chamber

a—初始岩浆房中的情况

b—第二亚旋回喷发时岩浆房中的情况

能与长石、蓝方石等含Ca矿物在岩浆房的下部富集有关。

(3) 除Ba外,其它不相容元素几乎都在顶部富集。

(4) 第一过渡系列的元素几乎都在底部富集,这可能与暗色矿物(主要是单斜辉石)的结晶分离有关。

(5) K是在顶部富集而Na在底部富集,与之相对应, Ca、Sr、Ba 在底部富集而Rb在顶部富集。

由于次火山岩和中央侵入岩在成分上与喷出岩呈一定的过渡关系,它们来自具成分梯度的岩浆房的更深部位,若将它们也包括进去,则岩浆房中的成分分带现象表现得更为明显<sup>(1)</sup>。

### 3. 斑晶矿物的梯度与相分界层

不仅化学成分如此,斑晶矿物的含量、矿物组合以及单种矿物的成分随着时间推移也具

明显的变异,反映了岩浆房中斑晶矿物具有梯度性变化。在第一亚旋回的产物中,斑晶矿物的这种梯度以假白榴石含量的变化最为特征,即随着喷发产物由玻基假白榴石响岩突然过渡到假白榴石响岩,再经方钠石假白榴石响岩、含假白榴石粗面岩,最后到粗玄岩,假白榴石斑晶的含量除在最早喷出的少量玻质响岩中极少外,在其它岩石中由  $40\% \pm$  (假白榴石响岩) 逐渐降低到  $3\% \pm$  (含假白榴石粗玄岩),最后到假白榴石斑晶完全缺失(黑云母粗玄岩),与之相对应,暗色矿物黑云母和单斜辉石的含量则逐渐增大,斜长石斑晶的成分也越来越基性,由  $An = 8 \pm$  渐增到  $An = 40 \pm$ ,说明岩浆房中白榴石由于比重较小聚集到顶部,而暗色矿物以及斜长石由于比重较大而向下部沉降。同样,在第二亚旋回的产物中,斑晶矿物成分及其含量的变化也有一定的规律,蓝方石含量由在岩浆房顶部的约  $1.5\%$  (蓝方石响岩 质熔

结角砾岩的浆屑代表之),向下渐增到  $8\% \pm$  (蓝方石响岩代表之)。相应地单斜辉石也由微量增加到约  $10\%$ ,斜长石成分由  $An = 5$  渐增到  $An = 35-50$ 。

娘娘山碱性火山活动最初喷出的岩浆中斑晶含量很低( $< 3\%$ ),近于无斑隐晶质,以后突然过渡到富含斑晶的岩浆喷发,这表明岩浆房中存在着一个富含挥发分的分界层,其温度较低、厚度较小,作为富含斑晶的主岩浆体的顶盖,它的存在将会阻止岩浆房的主要部分与围岩发生较大规模的同化混染作用<sup>[5]</sup>。因而,该火山活动持续的时间虽然较长,其中发生了明显的分异作用,但这种成分较为特殊的岩浆与地壳间互相作用的程度较弱( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值为  $0.7054$ ),加之挥发分含量随火山活动进行而不断减少的现象也说明岩浆房中确有这样的一个分界层存在。在 Hildreth (1981) 的热重力柱模式中,这个分界层是沿岩浆房周壁上升的温度较低而富含挥发份的流体,它们在岩浆房的顶部聚集形成一个近于停滞的“顶盖”,岩浆房中温度梯度的存在所必然引起的挥发份浓度梯度,使这个“顶盖”得以存在并使

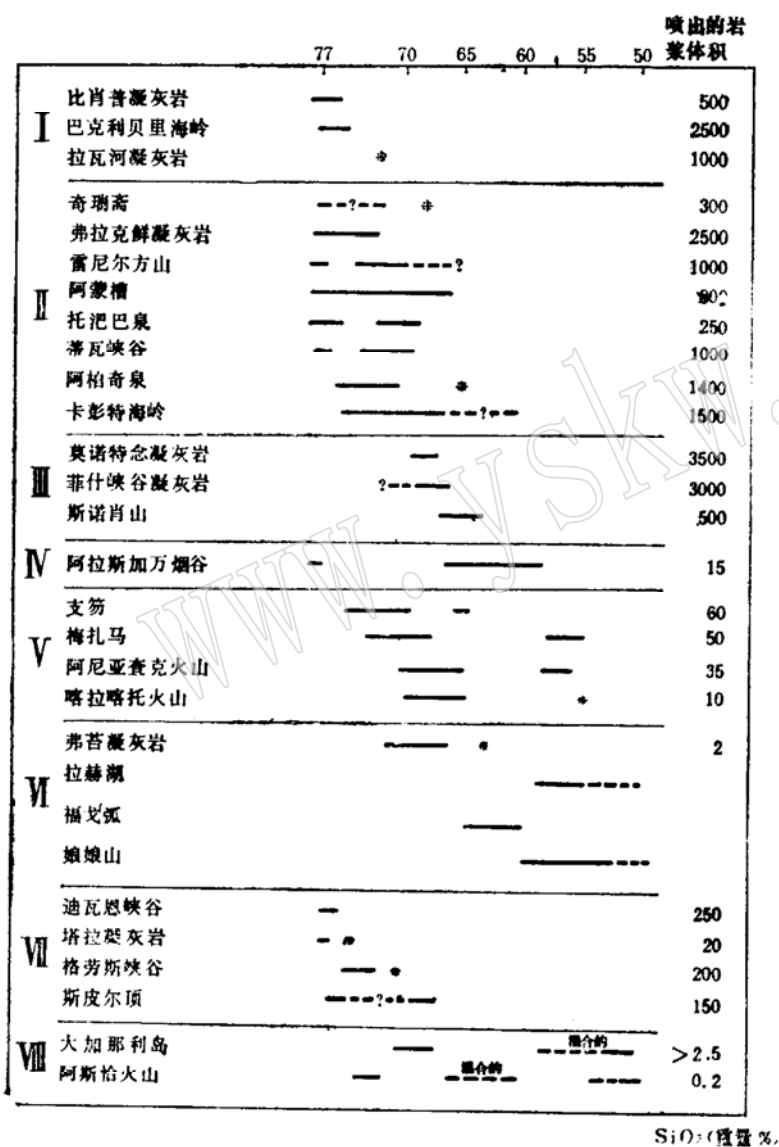


图 5 一些喷发单元中  $\text{SiO}_2$  的变化范围与估计的岩浆体积

Fig. 5  $\text{SiO}_2$  ranges and estimated magma volumes of some eruptive units

\* 为主喷发单元形成后熔岩的成分, ...或? 表明这里的成分可能是连续的。

之随着岩浆演化程度的加强而不断扩大。

#### 4. 成分梯度的基本类型

近代对大多数火山碎屑流堆积物的详细研究,已揭示出岩浆房中温度、矿物成分、化学成分以及其它类型梯度的存在。这种梯度既可出现于大规模的钙碱性岩浆房内,也可出现于一些小的碱性岩浆房中。Hildreth (1981) 将岩浆房中的成分梯度归为八类,与之相比较,娘娘山碱性岩浆房中的梯度特征应属于第六类(图5)。图5中我们还收列了体积较小但具明显成分分带的拉赫湖(Laacher See)凝灰岩( $\text{SiO}_2$ 为50—58%)和福戈弧(Fogo A)凝灰岩( $\text{SiO}_2$ 为60—65%),因此该类已不再如Hildreth所认为的那样, $\text{SiO}_2$ 仅限于66—71%之间,而具更宽的成分范围,岩浆房内的成分分带现象可出现于 $\text{SiO}_2$ 为50—71%的任何区间,形成梯度的机理也并不都是如他所说的那样以热重力扩散和挥发分络合作用为主,有些岩浆房中成分的梯度和分带性主要是由矿物的分离结晶作用完成的,而所谓的热重力扩散作用在这里充其量只起次要作用(如娘娘山岩浆房和拉赫湖岩浆房)。

### 三、结晶分异是岩浆房中梯度形成的主要机理

既然娘娘山碱性岩浆中成分梯度的基本特征与硅质岩浆房中的情况类似,我们可以认为,与流纹质岩浆通常是作为玄武岩熔体的“帽子”的情况<sup>[6]</sup>相类似,响岩质和粗面质岩浆可能是作为硅不饱和的碱性岩浆的“帽子”而存在的(参见Wolff等,1984<sup>[6]</sup>)。娘娘山两个亚旋回早期喷出的粗面质—响岩质岩浆后都紧跟有基性碱性岩浆的活动。由于演化程度不同的岩浆体中具相似的成分分带特征,因而可以认为,所有分异程度较高的岩浆体中成分梯度的建立都应有一个普遍的成因机理。Michael[1983 a、b]曾指出,绝大多数体系内成分变化的情况完全可用晶体的分离作用加以解释。Wolff等人(1984)的研究也证实,晶体的分离是高碱岩浆房中成分梯度形成的主要机理。娘娘山岩浆房中斑晶矿物含量及矿物组合的变化与化学成分梯度之间的密切联系说明了这一点。

#### 1. 分离结晶的矿物学证据

前已讨论,斑晶矿物含量及矿物组合在岩浆房中存在着梯度,有些矿物由于比重较小而上浮,另一些矿物由于比重较大而下沉,本区岩浆房中有关矿物的分离结晶情况如下:

石榴石:石榴石晶体由于比重较小,当条件适宜时可局部地聚集到岩浆房的较高部位,岩浆房中对流作用的存在更有利于这种作用的进行。娘娘山第一亚旋回产物含有较多的石榴石转变的矿物相——假石榴石,且随着喷发作用的进行,其含量逐渐降低,到晚期完全缺失,代之以比重较大的矿物相蓝方石,说明岩浆房中发生有石榴石的分离结晶作用。

长石:在整个碱性杂岩体中,长石的含量,特别是碱性长石的含量很高,可以预见它们的分异对于岩浆房中成分梯度的建立将起着重要作用。对于这一点,元素Ba在岩浆房中所表现出的特征是个很好的说明,与其它不相容元素顶部富集的情况相反,它与Ca、Sr一样是在底部富集(参见表1,图4b)。说明是长石的结晶沉降使岩浆房的下部更富Ca(因两种长石中Ba的分配系数均大于1)。岩浆房中斜长石(以及钾长石)含量向下不断增加的现象(图4b)证实了长石的分离结晶作用的存在。

单斜辉石:单斜辉石在岩浆房中也是向底部堆积,因而造成越向下部辉石含量越高的现象。从图6中可进一步看出,单斜辉石在岩浆演化过程中,特别是在由硅不饱和的碱性岩浆



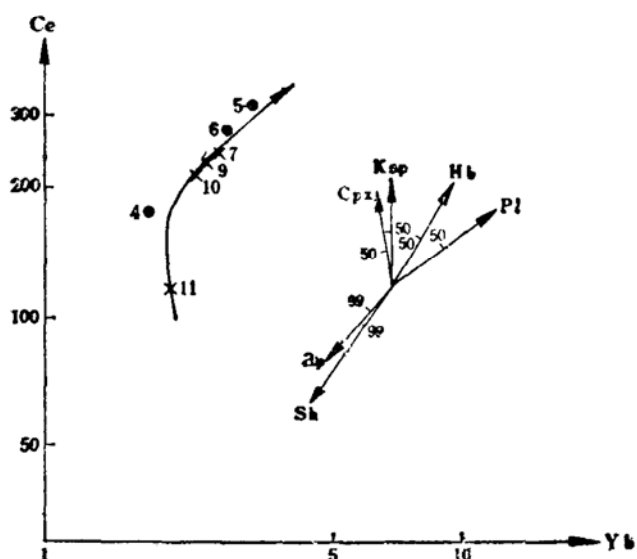


图 6 娘娘山碱性岩的Ce—Yb图解

Fig. 6 The Ce—Yb diagram for alkaline rocks of Niangniangshan

图中所用分配系数由作者实测<sup>[1]</sup>；图中样品编号同表1；矿物代号见表2

(下伏主岩浆体, 样号11) 分异形成的上部响岩质和粗面质岩浆“帽子”(样号7、9、10)的过程中起着重要作用。从图中还可看出, 由于斜长石和碱性长石的结晶下沉而使岩浆房的顶部稀土元素Ce和Yb的含量不断增加。

此外, 作为娘娘山第二亚旋回主要造岩矿物之一的蓝方石对岩浆房中梯度的形成也起着重要作用, 它的沉降是造成岩浆房下部富钠和铈的另一个重要原因。

## 2. 矿物分离结晶混合计算

虽然说矿物的分离结晶对本岩浆房中梯度的形成起重要作用, 但岩浆房中斑晶矿物的运移情况是复杂的。由于碱性岩浆房中的粘度较大以及熔体相本身密度梯度的存在, 矿物的这种重力分异作用并不能充分进行, 它们可能滞留于

岩浆房的某一部位, 对于其密度与液相密度相似的那些矿物(如钾长石)来说, 这种情况更易发生。因而对于岩浆房的某一特定层位而言, 与原均匀的母岩浆相比, 其中既包含着一些矿物相的分离, 又包含着另外一些矿物相的加入。作者根据“线性最小二乘法——质量平衡”方程<sup>[9]</sup>, 进行了矿物分离结晶混合计算, 以解决在原生母岩浆中(未发生明显成分分带的均匀岩浆)加入(或减去)一个(或几个)矿物相后, 派生岩浆的成分。当然, 某一阶段的派生岩浆可作为进一步演化岩浆的母岩浆。我们在PC-1500微机上将破火山口内所出现的各种岩石之间作可能的母子关系计算。依据尽量使所有氧化物的残差最小的原则, 并考虑到使计算所得到的母、子岩浆比例合理, 以及分离的矿物相应符合于实际观察的基础上, 对所得的数据进行了合理的取舍, 结果列于表2。从表中可以看出, 在整个碱性岩浆的分异过程中白榴石总是向岩浆房的上部集中, 而蓝方石、斜长石、单斜辉石、角闪石则是向岩浆房的下部聚集。钾长石在岩浆房中的运移情况较为复杂, 如第二亚旋回由基性的碱性岩浆(N-5-2)分异形成上部响岩质和粗面质“帽子”时, 有大量的钾长石向上集中, 但在这个“帽子”的内部, 又有钾长石结晶下沉的现象发生。计算结果验证矿物的分离结晶是岩浆房中梯度形成的主要原因。

计算时我们把成分类似于碧玄岩的中央侵入岩筒作为娘娘山碱性杂岩的母岩浆, 其它岩浆则是由它派生而来的。当然这里是假设该岩筒的成分代表“真正”纯岩浆熔体, 但岩浆房上部结晶的矿物(如单斜辉石、蓝方石等)不同程度的堆积将有可能使其成分发生改变。尽管如此, 在模拟整个成分变化时还是以它开始的, 这是因为:

(1) 当忽略晶体堆积对整个岩石成分的影响时, 该岩筒无疑代表该杂岩中铁镁质组份。



表 2 矿物分离结晶混合计算结果

Table 2 Summary of fractionation calculation

母岩浆	派生岩浆	加入或减去的矿物占原生岩浆的wt%							减去的矿物wt%	加入的矿物wt%	残差
		Pl	Bi	Hb	Cpx	Hau	Lc	Af	-F(%)	+F(%)	OX <sup>2</sup>
N-5-2	N-6-1	25.95	0.23	-4.37	-2.17	-16.22	-23.96	6.19	46.74	32.36	0.01
N-6-1	N-5-1	-4.26	-2.71	-4.57	1.31		8.17	-6.19	7.72	9.48	0.07
N-5-1	R225-1	-5.93	7.37	-5.99	-22.74		-11.62	28.14	46.27	35.51	4.96
N-5-2	N-8-1	-6.65	-10.64	6.71	-13.01	0.65		79.46	30.01	86.82	1.32
N-8-1	N-1-1	-3.25	-0.99	-3.97	0.86	-0.35		-17.57	26.13	0.86	0.42
N-1-1	N-7-1	11.35	5.63	-7.29	0.51	-5.61		-0.02	12.92	17.49	0.50

注：表内样品编号同表1。Pl—斜长石；Bi—黑云母；Hb—角闪石；Cpx—单斜辉石；Hau—蓝方石；Lc—白榴石；Af—钾长石。

(2) 任何堆积作用的程度都不能精确确定，所以也不能够确定“真正”铁镁质岩浆的成分。

(3) 晶体的堆积和分离是两个互补的作用过程，质量平衡混合计算不能把它们严格区分开。

### 3. 关于热重力扩散机制问题

这里所指的热重力扩散包括了对流循环和索列特扩散两种作用，Hildreth 等认为，正是由于这种作用的存在，才促使具有热和重力场的岩浆房发生成分分带。但由于在现阶段还不能定量地对它加以模拟，所以我们虽然承认矿物的分离结晶是娘娘山碱性岩浆房中梯度形成的主要原因，但也不能完全排除热重力作用所起的影响。何况对于斑晶矿物含量小于50%的岩浆体而言，若其中还没有形成一个稳定的成分梯度时，必然要发生对流<sup>[5]</sup>。岩浆房中对流作用的速率又远大于（至少大一个数量级）晶体沉降的速率，因而可使晶体呈悬浮状态存在于岩浆房中（Sparks 等，1984）。此外，岩浆本身所拥有的粘滞力也势将阻止晶体沉降作用的发生。所以有人认为，就现阶段所知道的分异机制而言，只有对流分异才能解释所观察到的现象（McBriney, 1980; Chen 等, 1980; Sparks 等, 1984），尤其是当中性岩浆结晶分异产生出演化岩浆时更是如此，此处的对流分异作用，促使中性岩浆房中具有浮力的分界面层上升，在其顶部聚集形成准静止状态的“帽子”，这种具双向扩散的分界面将会阻止下伏岩浆与围岩发生大规模的同化作用。饱和水溶液的实验也证明对流分异是一种普遍现象，当然这个实验结果是否适用于自然界真正的岩浆体还有待进一步证明。

可以认为由对流所控制的扩散作用在整个娘娘山碱性岩浆演化过程中起着一定的作用，改变着岩浆房内不同层位中元素的丰度，并促成贫斑晶而富含挥发份的“顶盖”的形成。但与比晓普凝灰岩相比，这种溶液的分异作用远次于矿物的分离结晶对岩浆分异作用的影响，而处于第二位。

## 结 论

娘娘山碱性火山杂岩是同一火山活动旋回、两个亚旋回的产物，它们来自同一岩浆房，该岩浆房曾两度建立起明显的成分梯度和分带性。尽管还不能排除其它机制的影响，但矿物

的分离结晶无疑是该岩浆房中梯度形成的主要原因。

### 参 考 文 献

- 〔1〕 陶奎元、吴岩、黄光昭、陈捷干, 1978, 娘娘山古火山口的构造和岩相特征, 地质学报, 第一期。
- 〔2〕 陶奎元、黄光昭、王美星, 1979, 南京娘娘山碱性火山杂岩及其成因, 中国地质科学院院报, 第一卷, 第一期。
- 〔3〕 黄蕴慧、周秀仲, 1982, 江苏铜井娘娘山碱性火山杂岩体中黝方石之正名——蓝方石, 岩矿测试, 第一卷, 第一期。
- 〔4〕 Smith, R. L., 1979, Ash-flow magmatism, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 180, 5—27.
- 〔5〕 Hildreth, W., 1981, Gradients in silicic magma chamber: Implications for lithospheric magmatism, *J. Geophys. Research*, V86, No B11, 10153—10192.
- 〔6〕 Wolff, J. A. and Storey, M., 1984, Zoning in highly alkaline magma bodies, *Geological. Mag.*, V121, No6, 563—575.
- 〔7〕 Worner, G. and Schmincke, H. U., 1984, Mineralogical and chemical zonation of the Laacher See tephra sequence (East Eifel, W. Germany), *J. Petrol.*, V25, No4, 805—836.
- 〔8〕 Worner, G. and Schmincke, H. U., 1984, Petrogenesis of the Zoned Laacher See Tephra, *J. Petrol.*, V25, No. 4, 836—851.
- 〔9〕 Wright, T. L. and Doherty, P. C., 1970, A linear programming and least squares Computer method for solving Petrologic mixing problems, *Bull. Geol. Soc. Am.*, V81, 1995—2008.

## The Characteristics and Origin of Gradient in Niangniangshan Alkaline Magma Chamber

Tao Kuiyuan                      Xue Huaimin

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources)

**Key Words:** niangniangshan, magma chamber, compositional gradient, crystal fractionation, thermogravitational effect

### Abstract

Niangniangshan alkaline volcanic complex developed in the late stage of Mesozoic volcanic activities in Ningwu volcanic structural depression was special type of rock association. In general, they were characterized by rich-potassium, LREE and other hygromagmaphile elements in geochemistry. This alkaline volcanic complex can be subdivided into two parts, belonging to the products of two sub-cycles of volcanic activities respectively. The lower part of this rock association bears pseudoleucite, characteristic mineral rich in potassium, and the upper part of this association bears hauyne, characteristic mineral rich in sodium. In this paper, we suggest that they came from a same magma chamber with compositional gradients by means of the petrologic, petrochemistry and trace elements geochemistry study.

The crystal fractionation accounts for coming to compositional gradient in the chamber, but thermogravitational effect may play some role during magma differentiation, particularly for the generation of capping layer rich in volatile components. The mass balance calculations quantitatively modeled the crystal fractionation process in the chamber, and confirmed the results observed. That is to say, as a mineral of the lower density, leucite phenocrysts accumulated in the top part of the chamber, whereas those phenocrysts having higher density (such as pyroxene, hauyne, plagioclase) settled downward in the chamber.

www.yskw.ac.cn