

天目山火山岩的反序现象及其成因

汤德平

(福州大学, 福州 350002)

关键词: 火山岩; 带状岩浆房; 天目山

摘要: 浙江天目山地区的中生代火山岩由流纹岩、英安岩、安山岩组成, 其喷发存在反序现象。笔者用带状岩浆房的模式解释了该区火山岩的特点, 应用各种物理化学方法建立了岩浆房中存在的温度、密度和粘度梯度。主要元素及微量元素的行为及其定量模拟表明, 分离结晶是导致岩浆成分变化的主要机理。然而, 各种矿物在岩浆房中的沉降速度计算表明, 尤其是酸性岩浆中, 晶体的重力沉降是不可能的。因此, 岩浆房中存在的分离结晶现象主要是通过对分离作用进行的。

天目山火山岩属中国东部中生代火山岩带, 以前还没有人对其进行过详细的岩石学工作。笔者从岩相学、矿物学及岩石化学等方面对该区火山岩进行了研究, 探讨了岩浆的分异机理, 提出了带状岩浆房的成因模式。

一、火山岩地质

天目山位于浙江西北部。该区火山岩堆积在下古生代沉积地层之上, 面积约

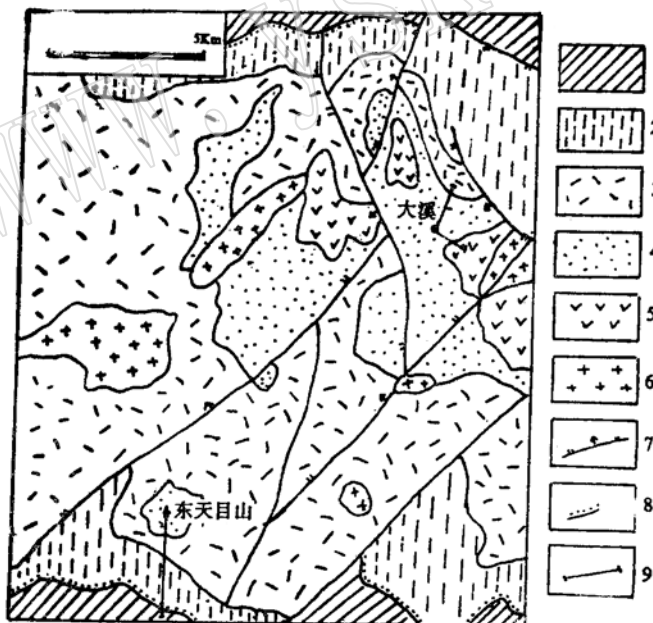


图1 天目山地区火山岩地质简图
(据浙江省区测队资料^①修改)

Fig. 1 Sketch map of the volcanic rocks of Tianmushan area
1—基底岩层; 2—第一旋迴; 3—第二旋迴; 4—第三旋迴; 5—第四旋迴; 6—侵入岩; 7—断层; 8—不整合面; 9—剖面位置

800km² (图1), 在区内构成数座1500m左右的山峰。岩石出露较好, 剖面较连续。通过野外工作, 结合前人的资料^①, 笔者将本区火山岩系划分为四个火山旋迴。它们在东天目山和大溪剖面上连续出露 (图2)。东天目山剖面由火山岩系下部的第一、二、三旋迴组成, 并见它们直接覆盖在寒武纪地层之上。大溪剖面见上部的第二、三、四旋迴。研究表明, 东天目山剖面顶部的英安岩及其下部的部分岩石与大溪剖面中部的英安岩及其下部的流纹质火山岩, 在岩石学和岩

① 浙江省区测队, 1967, 中华人民共和国区域地质调查报告, 临安幅。

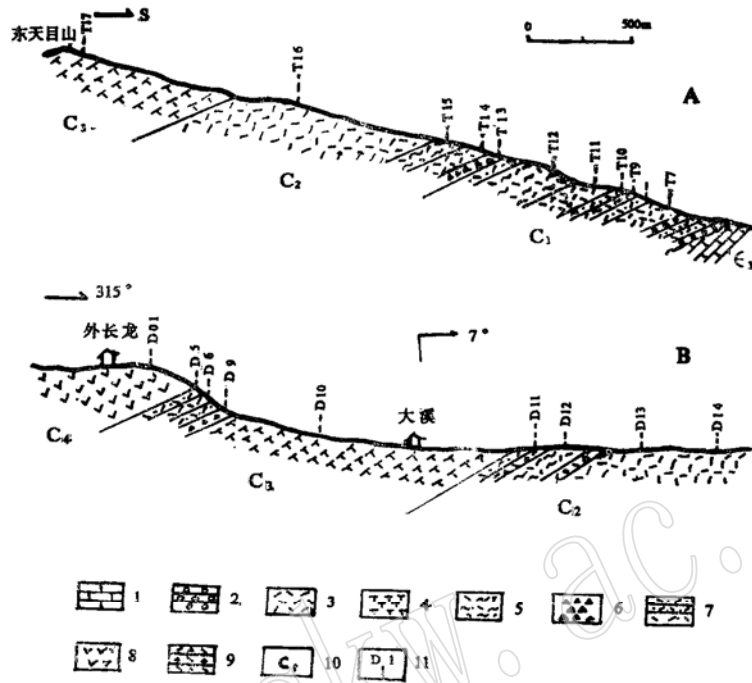


图 2 天目山地区火山岩剖面

Fig. 2 Section of the volcanic rocks in Tianmushan area

A—东天目山剖面; B—大溪剖面

- 1—灰岩; 2—砾岩; 3—流纹岩; 4—英安岩; 5—流纹质熔结凝灰岩; 6—火山角砾岩; 7—流纹质凝灰岩;
8—安山岩; 9—含砾凝灰岩; 10—旋迴; 11—取样位置及样号

石化学上有十分相似的特点，是可以对比的。因此，可以认为二者代表了一个连续的过程。

第一旋迴火山岩一般分布在较低的位置。下部以含较多的凝灰质砂岩、粉砂岩等火山沉积碎屑岩为特征，上部以火山角砾岩开始，含一套流纹质的凝灰岩、熔结凝灰岩和流纹岩，厚1250m。第二旋迴亦以火山角砾岩开始，由一套深灰色、紫红色流纹岩及流纹质熔结凝灰岩组成，厚约706m。第三旋迴出露的位置较高，主要为深灰色的英安岩、英安质熔结凝灰岩，底部含有火山集块岩，厚约1280m。第四旋迴分布较少，见于大溪剖面的顶部，主要由一套灰黑色的安山岩组成，岩性较为单一，厚度>540m。

由此可见，本区不同期次火山喷发产物的成分变化有一个十分显著的特点，即从早期到晚期，火山岩成分由流纹质—英安质—安山质。这与一般岩浆演化由基性—酸性的方向恰好相反，存在“反序”现象。

二、岩相学与岩石化学

本区火山岩主要包括安山岩、英安岩、流纹岩及相应的火山碎屑岩。安山岩为斑状结构，斑晶含量约25%，主要成分为斜长石（60%）、普通辉石（35%）、磁铁矿（5%），斜长石具环带，基质为交织结构。英安岩的斑晶含量约30%，矿物成分为钾长石（40%）、

斜长石 (30%)、普通辉石 (10%)、黑云母 (5%)、角闪石 (5%) 及磁铁矿等, 普通辉石见有角闪石的反应边。副矿物见有锆石、磷灰石等, 它们常包裹于暗色矿物斑晶中。基质为微晶结构。流纹岩常具有流动构造, 斑晶含量约15—20%, 成分为石英 (30%)、钾长石 (30%)、斜长石 (25%)、黑云母 (10%), 石英斑晶熔蚀现象十分明显。副矿物见有磷灰石、锆石、榍石及磁铁矿等。基质具微晶结构, 霏细结构, 主要由长石和石英组成。

表 1 造岩矿物电子探针分析

Table 1 Microprobe analyses of rock-forming minerals

矿 物	碱 性 长 石						斜长石	
	流 纹 岩				英 安 岩		流 纹 岩	
岩 石	T07-2	T12-1	D13-2	T16-3	T17-1	D10-3	D12-2	T16-2
样 号	T07-2	T12-1	D13-2	T16-3	T17-1	D10-3	D12-2	T16-2
SiO ₂	70.37	65.07	65.46	66.94	66.76	67.32	68.47	61.73
TiO ₂	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00
Al ₂ O ₃	19.34	17.29	17.51	18.34	18.30	18.28	19.48	23.85
FeO	0.00	0.06	0.24	0.17	0.00	0.13	0.00	0.24
MnO	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.04
MgO	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.08
CaO	0.03	0.00	0.00	0.40	0.35	0.23	0.30	5.94
Na ₂ O	10.25	0.42	0.34	4.20	4.06	1.61	11.30	7.47
K ₂ O	0.09	16.21	15.69	9.88	10.20	11.13	0.31	0.88
Cr ₂ O ₃	0.07	0.00	0.09	0.77	0.00	0.11	0.05	0.00
BaO	0.00	0.49	0.00	0.02	0.41	0.28	0.00	0.04
总 和	100.78	99.74	99.56	100.06	100.32	99.15	100.03	100.27
An或Di	0	0	0	2	2	1	1	29
Ab或En	99	4	3	38	37	18	98	66
Or或Fs	1	96	97	60	61	81	1	5
矿 物	斜 长 石				辉 石		磁 铁 矿	
岩 石	英 安 岩		安 山 岩		英安岩	安山岩	英安岩	安山岩
样 号	T17-2	D10-2	D1-2	D1-6	D10-1	D1-3A	D10-6	D1-4
SiO ₂	58.02	60.62	55.88	53.00	52.44	52.59	1.04	0.15
TiO ₂	0.09	0.00	0.00	0.00	0.10	0.52	13.17	14.51
Al ₂ O ₃	26.13	23.80	27.01	28.50	0.89	1.95	1.55	2.48
FeO	0.32	0.11	0.33	0.83	11.98	9.32	76.28	73.90
MnO	0.00	0.13	0.05	0.00	0.62	0.50	1.03	0.29
MgO	0.12	0.00	0.00	0.05	13.19	14.55	0.01	0.09
CaO	8.36	6.27	9.87	11.98	19.18	19.16	0.76	0.00
Na ₂ O	6.27	6.89	5.18	4.21	0.46	0.42		
K ₂ O	0.66	1.17	0.61	0.32	0.01	0.00		
Cr ₂ O ₃	0.08	0.00	0.08	0.14	0.09	0.00	0.24	0.20
BaO	0.14	0.34	0.18	0.00	0.14	0.00		
和 总	100.38	99.46	99.19	99.04	99.10	99.79	98.98	92.35
An或Di	41	31	49	60	40	41		
Ab或En	55	62	47	38	39	43		
Or或Fs	4	7	4	2	21	16		

表 2 天目山火山岩的主要元素及微量元素成分
Table 2 Major element and trace element compositions of volcanic rocks in Tianmushan

岩石名称	流纹岩				英安岩		安山岩
	一		二		三		四
样号	T07	T12	D13	T16	D10	T17	D01
SiO ₂	68.08	70.05	70.52	70.39	63.32	64.03	59.47
TiO ₂	0.55	0.45	0.26	0.23	0.72	0.76	1.03
Al ₂ O ₃	13.72	14.27	14.17	14.44	16.55	16.55	16.51
Fe ₂ O ₃	2.91	1.39	1.26	1.06	2.18	2.48	2.31
FeO	0.32	0.95	1.16	1.64	2.24	1.97	3.07
MnO	0.11	0.14	0.10	0.10	0.05	0.11	0.10
MgO	0.61	0.39	0.20	0.33	1.14	1.80	2.17
CaO	2.43	1.25	1.11	1.13	3.04	2.91	5.38
Na ₂ O	2.96	3.31	2.34	3.66	3.35	3.58	2.95
K ₂ O	4.39	5.68	6.69	5.45	4.86	5.23	3.52
P ₂ O ₅	0.12	0.08	0.07	0.04	0.09	0.13	0.22
H ₂ O ⁺	1.64	0.92	1.07	0.66	2.37	1.05	2.08
H ₂ O ⁻	0.38	0.20	0.19	0.26	0.27	0.21	0.42
CO ₂	1.75	0.84	0.80	0.24	0.23	0.08	0.36
总和	99.97	99.92	99.94	99.63	100.41	100.23	99.59
La	43.70	44.40	53.80	43.90	37.20	33.10	31.10
Ce	95.00	91.90	111.00	86.90	73.20	75.30	66.90
Nd	34.50	30.90	51.20	30.40	36.40	28.70	31.40
Sm	6.570	6.650	7.320	6.410	6.220	5.450	6.180
Eu	0.879	0.835	0.869	0.967	1.950	1.910	1.990
Gd	6.140	5.950	6.760	4.060	4.950		
Tb	1.080	0.919	1.260	0.920	0.919	0.829	1.190
Yb	3.510	3.670	3.640	3.140	2.810	2.910	2.710
Lu	0.525	0.560	0.525	0.521	0.406	0.444	0.437
Cr	14.20	9.4400	9.3501	8.1301	11.30	15.30	16.40
Co	10.00	3.920	2.910	1.960	8.990	6.400	1.090
Cs	5.410	5.600	8.000	4.030	7.550	5.630	5.280
Rb	178.00	213.00	338.00	198.00	177.00	162.00	105.00
Sr	382.00	59.80	176.00	58.50	698.00	337.00	307.00
Ba	480.00	549.00	299.00	337.00	1090.0	1570.0	612.00
Sb	0.110	0.180	0.0784	0.0501	0.0929	0.1900	0.0301
Sc	6.390	4.460	5.050	4.460	9.500	9.050	11.60
Zr	245.00	217.00	167.00	293.00	275.00	301.00	291.00
Hf	11.50	13.10	8.5000	12.80	8.3101	14.40	8.5000
Ta	1.120	1.540	1.980	1.750	1.040	1.010	1.050
Th	22.60	22.40	24.20	19.40	13.30	13.00	9.58
U	3.210	4.250	4.680	2.320	3.210	1.770	1.510

注：主要元素由中国地质大学化学分析室用湿化学法分析。

微量元素由中国科学院高能物理研究所用中子活化法分析，单位ppm。

各类岩石中主要造岩矿物斑晶的电子探针分析结果见表1。

不同旋迴火山岩的主要元素和微量元素分析见表2,由表2可知本区火山岩的碱质较高。 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 7—11%, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 。REE配分曲线表现为LREE相对富集。在安山岩和英安岩中不出现Eu的负异常(图3),这一特点也见于浙西的莫干山^[1]、寿昌^[2]等地的火山岩中,这可能是浙西中、酸性火山岩REE的共同特点。随着岩石中 SiO_2 含量的增大,流纹岩中明显出现Eu负异常。

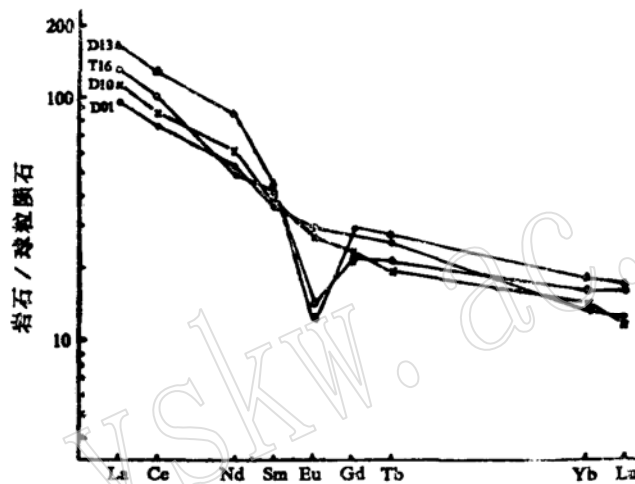


图3 天目山火山岩的稀土配分曲线

Fig. 3 REE distribution patterns of the volcanic rocks in Tianmushan
D01—安山岩; D10—英安岩; T16—流纹岩; D13—流纹岩

三、岩浆的分异及其机理

本区火山岩成分变化范围较大, SiO_2 59—70%,但各氧化物的变化较为协调。随着 SiO_2 的增加, TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 FeO 等降低,而 K_2O 逐步上升,构成一个连续的演化系列。不相容元素的行为对判断岩浆的演化机理有十分重要的意义。在Ce/Yb—Ce图(图4)上,不同旋迴火山岩的成分点基本在一条水平线上,表明分离结晶可能是本区岩浆分异的主要机理^[3]。为了证实这一结论,笔者作了进一步的定量计算。

首先采用岩石学混合计算模式^[4]进行主要元素分离结晶过程的模拟,计算分二阶段进行。计算结果的总残差平方和(Σr^2)均小于0.4(表3),拟合效果很好。安山质—英安质岩浆阶段,分离的主要矿物为斜长石及辉石。英安质—流纹质阶段除斜长石、辉石和磁铁矿外,还涉及较多的钾长石,且辉石含量明显减少。这些分离矿物的种类和比例与相应岩石中观察到斑晶矿物组合相似,表明计算结果是合理的。

在此基础上进一步进行了REE的定量计算。根据上述计算得到的各矿物的比例、扣除量、有关矿物的分配系数^[5,6]以及初始岩浆的REE成分,采用瑞利分馏定律便可计算出派生岩浆中REE的含量。其结果表示于图5,可见计算值与实际值基本吻合。

需要指出的是,由于一些副矿物的分离结晶对主要元素的变化影响不大,所以在主要

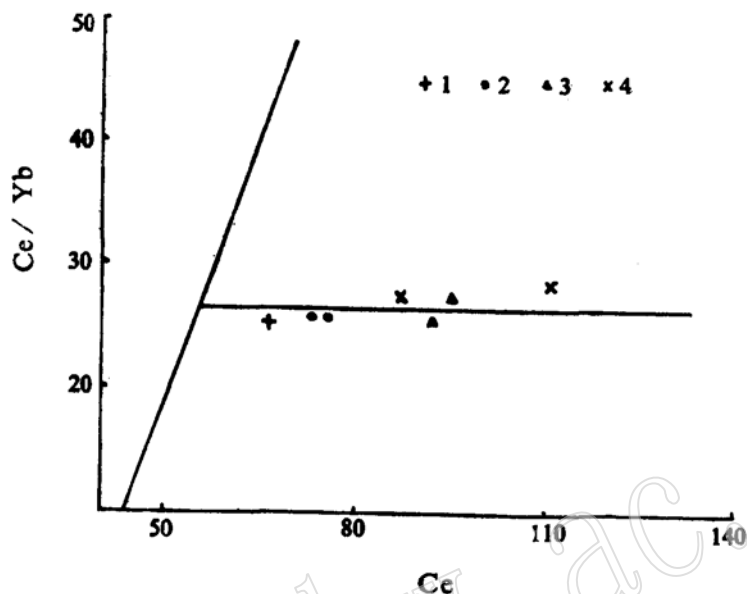


图4 天目山火山岩的Ce/Yb—Ce图

Fig. 4 Ce/Yb—Ce diagram of volcanic rocks in Tianmushan area

1—第四旋迴；2—第三旋迴；3—第二旋迴；4—第一旋迴

表3 主要元素的分离结晶计算

Table 3 Calculation of fractional crystallization of major elements

阶段	安山岩(D01)—英安岩(D10)				英安岩(D10)—流纹岩(T16)			
	初始*	派生*(实际)	派生(理论)	残差	初始	派生(实际)	派生(理论)	残差
SiO ₂	61.768	65.123	65.195	-0.073	65.123	71.593	71.660	-0.067
TiO ₂	1.070	0.740	0.979	-0.238	0.740	0.234	0.447	-0.213
Al ₂ O ₃	17.148	17.021	17.084	-0.063	17.021	14.687	14.888	-0.201
FeO	5.348	4.322	4.323	-0.002	4.322	2.634	2.660	-0.026
MnO	0.104	0.051	0.068	-0.017	0.051	0.102	0.008	0.094
MgO	2.254	1.172	1.259	-0.086	1.172	0.336	0.642	-0.306
CaO	5.588	3.127	3.064	0.063	3.127	1.149	1.012	0.137
Na ₂ O	3.064	3.445	3.263	0.182	3.445	3.723	3.355	0.367
K ₂ O	3.656	4.998	4.765	0.233	4.998	5.543	5.329	0.215
Σr ²	0.165				0.393			
矿物	Pl**	Cpx	Mt		Cpx	Pl	Or	Mt
样号	D1-6	D1-3A	D1-4		D10-1	D10-2	D10-3	D10-6
扣除量	-12.93	-8.34	1.33		-5.394	-25.889	-22.033	-2.994
比例	57.22	36.85	5.89		9.58	45.98	39.13	5.31
总扣除量	-22.60				-56.31			

* 初始岩浆和派生岩浆(实际值)的成分为相应岩石成分(表2)除去P₂O₅及挥发分后换算为100%的结果。

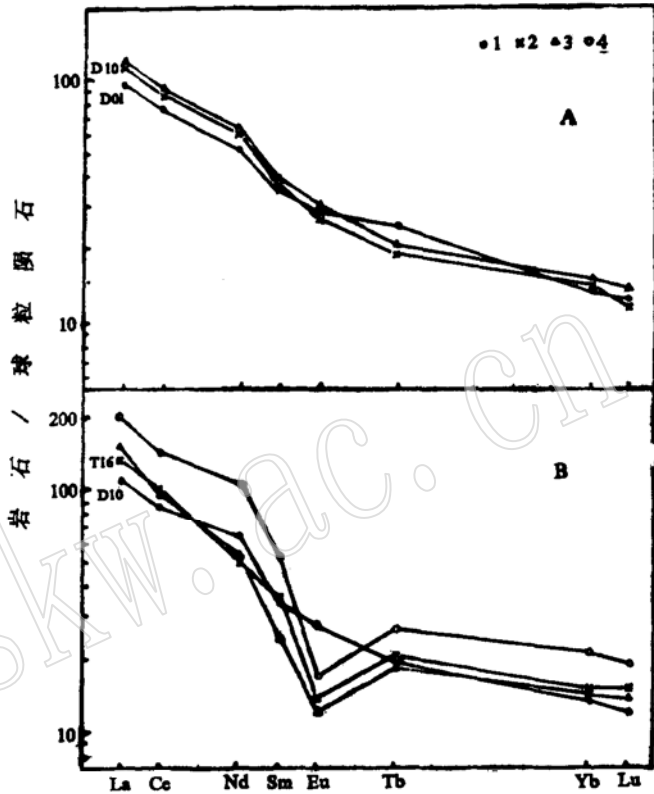
** 矿物成分见表1。

元素的计算中没有涉及,但它们对微量元素的变化有较大的影响。岩相学的研究已表明,在英安岩和流纹岩中含有磷灰石和锆石等。元素的变异也反映从英安质一流纹质岩浆, P_2O_5 和Zr是急剧下降的。基于这些原因,在英安质一流纹质岩浆的REE计算中加入了少量的磷灰石(Ap)和锆石(Zir)。图5B上将加和未加副矿物的二种结果进行了比较,证实副矿物对微量元素的分异具有较大的影响。这告诫我们在研究岩浆演化过程中微量元素的变化时,不能忽略副矿物的作用。

上述计算均证明了分离结晶是导致本区火山岩成分变化的主要机理。

图5 稀土元素的定量模拟
Fig. 5 Quantitative modeling for REE

A—安山岩—英安岩, B—英安岩—流纹岩
1—初始岩浆; 2—实际的派生岩浆;
3—计算的派生岩浆(计算中所用的矿物比例A: 见表3; B: 46%Pl + 9.6% Cpx + 40%Or + 5%Mt + 1.5%Ap + 0.3%Zir); 4—未加副矿物时计算的派生岩浆成分(矿物比例见表3)



四、带状岩浆房

天目山地区火山岩在喷发顺序上存在成分的反序现象。近年来,中酸性火山岩中的这种反序现象已越来越多地被人们所认识,并认为是岩浆房中成分分带的结果^[7,8]。研究表明,许多岩浆房并不象人们过去所认为的那样是一个均匀的体系,而是具有分带性(zonation),即存在各种物理化学梯度。在火山的喷发过程中,岩浆房中的岩浆被自上而下地逐层抽取喷发。因而在喷发产物中保留了与岩浆房中成分变化梯度相反的火山岩层序。

本区火山岩的反序现象也可以从该模式得到较好的解释。如果我们设想从早期到晚期的喷发产物恰好代表了岩浆房中自上而下不同层位的岩浆,表2中元素的变化规律清楚地反映了该岩浆房中化学梯度的存在。 SiO_2 、 K_2O 含量向上增加, TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 等降低。La、Ce、Th、U等元素向上呈富集趋势,而Cr、Sr等贫化。这些变化规律在第四至第三旋迴所代表的岩浆房下部至上部的成分变化过程中尤为明显。

带状岩浆房的建立还需要得到其他物理化学梯度的证实,对此需作进一步的探讨。

从早期到晚期,本区火山岩中暗色矿物的种类具有黑云母→黑云母+角闪石+辉石→辉石的变化规律。它暗示了岩浆房中挥发分从下到上逐步升高的变化梯度,它们的存在对

带状岩浆房的形成具有重要的意义^[7]。

温度梯度的存在是导致岩浆房中成分分带的根本原因之一，而密度梯度则是保证带状岩浆房稳定的重要条件^[7]。考虑到长石是普遍存在的斑晶，笔者采用Smith (1983)^[9]的长石-液体温度计进行了温度梯度的计算。计算中液相成分用全岩成分代之。计算结果见表4。

表 4 岩浆的平衡温度
Table 4 Equilibrium temperatures of magmas

旋 迴	熔 体		矿 物		温度 (°C)	平均温度 (°C)
	样 号	岩 石	样 号	名 称		
C ₁	T 07	流纹岩	T 07-2	Pl	930	930
	T 12	流纹岩	T 12-1 T 12-2	Or Pl	940 957	
C ₂	D 13	流纹岩	D 13-1 D 13-2	Pl Or	958 970	964
	T 16	流纹岩	T 16-2 T 16-3	Pl Or	962 962	
C ₃	T 17	英安岩	T 17-1 T 17-2	Or Pl	1038 1041	1039
	D 10	英安岩	D 10-2 D 10-3	Pl Or	1039 1045	
C ₄	D 01	安山岩	D 1-2	Pl	1054	1059
			D 1-6	Pl	1064	

在此基础上应用Bottinga等 (1982)^[10]和 Shaw(1972)^[11]的模式分别计算了不同层位岩浆的密度和粘度，同时考虑到压力和挥发分对密度和粘度的影响，笔者采用Birch-Murnaghan 状态方程进行了压力的校正。由于现在岩石中的含水量不能代表喷发时岩浆房中挥发分的梯度，必须先对此进行估算。Gill (1981)^[12]认为，造山安山岩中一般含有1—5wt%的水，作最保守的估计，我们假设安山质岩浆中水的含量为1wt%。同时假定每层递增0.5%，得到不同层位岩浆中水的含量。然后根据每增加1wt%水，熔体密度降低0.08g/cc的较正值^[13]进行密度的校正。计算结果见表5。

这些估算表明，岩浆房中从下到上温度逐渐降低，变化基本是连续的。较大幅度的变化发生在英安质与流纹质岩浆层之间。密度减小的趋势是明显的。水对密度有较大的影响，与无水的计算值相比，挥发分梯度的存在进一步加强了岩浆的密度梯度。相比之下，压力对密度的影响较小。自下而上粘度呈上升趋势，而挥发分对其有较大的影响。

从这些计算结果以及岩石的成分变化和野外观察可以推测，在天目山地区存在一个密度上稳定、具有物理及化学分带的岩浆房。该岩浆房下部的安山质—英安质部分，分带较明显。顶部可能具有一个梯度不明显、富SiO₂的岩浆层，二者之间可能存在一个界面或窄小的过渡带。

表5 计算的岩浆密度和粘度
Table 5 Calculated densities and viscosities of magmas

旋迴	样号	成分	温度 (°C)	水含量 (wt%)	密度 g/cc				粘度 mn (泊)
					1atm	1kb	2kb	3kb	
一	T 07	流纹质	930	0	2.368	2.380	2.403	2.424	19.15
				3.0	2.128	2.138	1.158	2.178	12.99
	T 12	流纹质	948	0	2.365	2.377	2.399	2.421	19.09
				2.5	2.165	2.176	2.196	2.216	13.90
二	D 13	流纹质	964	0	2.361	2.373	2.395	2.417	19.18
				2	2.201	2.212	2.233	2.253	14.55
	T 16	流纹质	965	0	2.376	2.388	2.410	2.432	18.32
				2	2.216	2.227	2.248	2.268	14.04
三	T 17	英安质	1039	0	2.457	2.469	2.492	2.515	14.32
				1.5	2.337	2.348	2.371	2.392	11.80
	D 10	英安质	1042	0	2.461	2.473	2.496	2.519	14.29
				1.5	2.341	2.352	2.375	2.396	11.75
四	D 01	安山质	1059	0	2.543	2.555	2.580	2.603	12.69
				1	2.463	2.475	2.498	2.521	11.14

Gill⁽¹²⁾认为,大陆边缘的地壳密度在2.4—2.9g/cc范围。Carr⁽¹³⁾提出的上地壳平均密度为2.54g/cc。如果岩浆在上升过程中停留并形成岩浆房的必要条件是 $\rho_{\text{岩浆}} \approx \rho_{\text{地壳}}$ 的话,根据本区中酸性岩浆的密度在含水条件下为2.46—2.52g/cc,可以推测,天目山岩浆房位于上地壳的较浅部位。这可能是带状岩浆房在喷发过程中其产物能够保留反序结构的条件之一。

五、岩浆分异的物理过程

如上所述,分离结晶作用是导致本区火山岩成分变化的主要机理。那么在一个带状岩浆房中,这种分离结晶作用是如何发生的呢?传统观念认为,分离结晶作用主要是通过晶体的重力沉降作用进行(Bowen, 1928)。但是,有许多学者认为这是不可能的。近年来发展起来的对流分离模型⁽¹⁴⁾已被越来越多的人所接受。该模型认为,在一个封闭的岩浆房中,大量的结晶作用发生在岩浆房边部。这些结晶作用改变了边部岩浆的成分,并降低了它们的密度,使其逐步向上迁移,聚集在岩浆房顶部,同时产生成分的分带现象。

为了探讨天目山带状岩浆房中存在的结晶分离现象,笔者用Stokes定律 $V = 2gr^2\Delta\rho/9\eta$ (Shaw, 1968)计算了一些矿物在不同成分岩浆中的沉降速度。计算中设晶体的形态为球形,其半径依岩石中斑晶矿物的大小估计。结果列于表6。

可以看出,各矿物晶体在安山质岩浆中的沉降速度较大,而在流纹质岩浆中要小得

表 6 岩浆中矿物的沉降速度
Table 6 Settling velocities of minerals in magmas

岩 浆 成 分	岩 浆				矿 物			沉降速度 (厘米/年)	
	密度 (g/cc)		粘度 (mm)		名 称	密 度 (g/cc)	半 径 (cm)	含 水	无 水
	含 水	无 水	含 水	无 水					
流 纹 质	2.23	2.39	14.04	18.32	Pl	2.65	0.1	23	0.20
					Or	2.55	0.1	17	0.12
					Bi	3.1	0.04	7.6	0.09
					Mt	5.2	0.01	1.6	0.02
英 安 质	2.35	2.47	11.75	14.29	Pl	2.7	0.1	189	9.8
					Cpx	3.3	0.05	128	8.9
					Mt	5.2	0.01	15	1.2
					Or	2.55	0.1	108	3.4
安 山 质	2.47	2.55	11.14	12.69	Pl	2.7	0.1	229	31.7
					Cpx	3.3	0.05	201	40
					Mt	5.2	0.01	26	6

注: 1. 岩浆的密度及粘度来源见表 3。

2. 矿物的密度据 Hughes (1982) 估算。

多。由于实际晶体并非球形, 岩浆亦非牛顿流体, 岩浆中可能存在的对流作用也阻碍晶体的下沉。因此, 矿物晶体的实际沉降速度比计算值还小。

根据这些分析, 笔者认为, 天目山带状岩浆房中的分离结晶主要是通过上述的对流分离作用进行的。晶体的重力沉降作用尤其在酸性岩浆中是不可能的。但它在中性岩浆中可能起一定的作用。本区岩浆房中, 下部的中性—中酸性部分各种梯度较明显, 而在上部的流纹质部分变化不大, 可能与此有关。

六、结 论

1. 天目山地区火山岩在喷发上存在反序的现象。这可以用带状岩浆房的模式得到较好的解释。分析表明, 在该岩浆房中存在主要元素、微量元素、挥发分及温度、密度和粘度的梯度。

2. 分离结晶作用是导致火山岩成分变化的主要机理。

3. 这种分离结晶现象主要是通过对流分离作用而不是晶体的重力沉降作用进行的。但后者可能对岩浆房下部的岩浆分异有一定影响。

本项研究中得到池际尚教授和邓晋福教授的热心指导。中国地质大学探针室的邵道乾、陈凤贤同志帮助进行矿物的探针分析。野外工作中得到浙江省区测队俞云文工程师的支持和帮助。谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] 潘德来等, 1987, 莫干山地区火山岩化学成分特征及成因探讨。浙江地质科技情报, 第一期, 18—25。
- [2] 谢芳贵等, 1984, 浙江寿昌地区中生代火山岩系的地球化学特征。南京地质矿产所所刊, 第四期, 1—18。

- [3] Allegre, G. J. and Minister, J. F., 1978, Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes; *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 38, 1-25.
- [4] Stomer, J. C. and Nicolls, J., 1978, XLFRAC: A program for the interactive testing of magmatic differentiation models; *Computer & Geosci.*, 4, 143-159.
- [5] Arth, J. G., 1976, Behavior of trace elements during magmatic processes; A summary of theoretical models and their applications; *J. Res. U. S. Geol. Surv.*, 4, 41-47.
- [6] Bacon, C. R. and Druitt, T. H., 1988, Compositional evolution of the zoned calc-alkaline magma chamber of Mount. Mazama, Crater Lake, Orogen; *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 224-256.
- [7] Hidreth, W., 1981, Gradients in silicic magma chambers; implications for lithospheric magmatism; *J. Geophys. Res.*, 86, 10153-10192.
- [8] Henry, C. D., Price, J. G. and Smyth, R. C., 1988, Chemical and thermal zonation in a mildly alkaline magmas system, Infiernito Coldera, Trans-Pecos Texas; *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 194-211.
- [9] Smith, M. P., 1983, A feldspar-liquid geothermometer; *Geophys. Res. Lett.*, 10, 193-195.
- [10] Bottinga, Y., Weill, D. F. and Richet, P., 1981, density calculations for silicate liquids, I revised method for aluminosilicate compositions; *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 909-919.
- [11] Shaw H. R., 1972, Viscosities of magmatic silicate liquids; an empirical method of prediction, *Am. J. Sci.*, 272, 870-893.
- [12] Gill, J. B., 1981, *Orogenic andesites and plate tectonics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [13] Carr, M. J., 1984, Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics at the central American volcanic front; *J. Volcan. Geotherm.*, 20, 231-252.
- [14] Huppert, H. E. and Sparks, J. S. R., 1984, Doublediffusive convection due to crystallization in magmas; *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 12, 11-37.

The Reversed Compositional Sequence and Origin of the Tianmushan Volcanic Rocks

Tang Deping

(Fuzhou University, Fuzhou 350002)

Key words: Tianmushan, volcanic rocks, zoned magmatic chamber

Abstract

The Mesozoic volcanic suite located in the Tianmushan Mount., northwestern Zhejiang Province, China, is, in ascending order, composed of rhyolite, dacite and andesite. A model of physically and chemically zoned magmatic chamber has been used for explaining this reversed compositional sequence. Gradients of temperature, density and viscosity in the chamber have been established according to some thermodynamic methods. Modeling for major and trace elements supports the idea that fractional crystallization is a main mechanism responsible for the chemical variation. The settling velocities of observed minerals in different magmas, which are estimated from Stocks' law,

indicate that gravitative settle is impossible, especially in the acid magma. Thus, convective fractionation (Huppert et al., 1988) is considered most probably to be the process accounting for the fractional crystallization in the zoned chamber.

www.yskw.ac.cn