

www.yskw.ac.cn

吉林省白头山火山岩的微量元素 及其岩石学意义

汤德平

田 丰

(中国地质大学)

(中国科学院地质研究所)

主题词: 白头山; 粗面岩; 过碱性; 微量元素

提 要: 白头山火山岩中含有一套粗面岩—钠碱流岩, 与下伏的长白山玄武岩组成一个岩石系列。在白头山火山岩中, REE、Zn、Zr 等元素十分富集, 而过渡元素及 Sr、Ba 等元素极其贫

化。REE配分具明显的Eu负异常,许多不相容元素在岩石系列中表现出良好的线性关系。依据微量元素行为的数学模式对这些特征进行定性分析和定量模拟,其结果表明白头山火山岩是由长白山玄武岩岩浆经结晶分异形成的。

白头山火山位于吉林省东部,是中国东部中生代火山岩带中最年轻的火山之一,其岩石主要由一套粗面岩—过碱性酸性岩组成。一些研究者曾对其进行了火山岩地质、岩石学等方面的研究,但微量元素方面的工作涉及较少。本文将着重讨论白头山火山岩的微量元素特征,并对它的成因及其演化作一些探讨。

一、火山岩地质

长白山地区广泛分布着年龄为19.9—1.48 Ma (刘嘉麒, 1983^[1]) 的新生代玄武岩。它构成了一个以白头山为中心,面积约10,000km²的玄武岩台地。白头山火山就是建筑在这样一个基础之上的新生代晚期的火山锥体(年龄为0.611—0.001050 Ma, 刘嘉麒, 1983), 面积约为160km²。

笔者在前人工作(方文昌, 1976^[2], 刘嘉麒, 1983, 郑祥身, 1983等^[3])的基础上,根据火山岩的野外关系、同位素年龄和岩性特征等将白头山火山岩地层划分为白头山组和白云峰组二大单元。其中白头山组由四段组成: 第一段(τQ_1^1)为灰绿色粗面岩; 第二段(τQ_1^2)由一套灰绿色、墨绿色的石英粗面岩、火山角砾岩及熔接凝灰岩组成; 第三段(τQ_1^3)包括蓝绿色、肉红色的钠闪碱流岩、火山角砾岩、集块岩等; 第四段(τQ_1^4)为一套绿黑色钠闪碱流岩、火山角砾岩等。白云峰组分为上下两段: 下段(τQ_2^1)主要为黄白色的浮岩; 上段(τQ_2^2)则由一套灰黑色的钠闪碱流岩质黑曜岩、火山角砾岩、熔接凝灰岩及凝灰岩组成。

作者曾对白头山火山岩的岩石学、矿物学及岩石化学进行了较为详细的研究^①。将白头山火山岩主要分为二类: 早期为非过碱性的中酸性岩(粗面岩、石英粗面岩), 晚期过渡为过碱性的酸性岩(钠闪碱流岩等), 它们与下伏的长白山玄武岩构成一个玄武岩—粗面岩—石英粗面岩—钠闪碱流岩的岩石系列。但二者之间在主要元素成分上存在一定的间断。

白头山火山岩大都具有斑状结构, 斑晶以碱性长石为主, 还含少量单斜辉石、铁橄榄石、铁钛氧化物等。早期的粗面岩中有少量斜长石, 钠闪碱流岩中见钠铁闪石斑晶, 而在末期的黑曜岩中含有一些石英斑晶。

二、微量元素特征

用等离子光谱对白头山火山岩的全岩样品作了微量元素分析, 其结果见表1。

1. REE、Zr、Nb、Y、Th

在白头山火山岩中, 除Eu以外的稀土元素都强烈地富集, 且从下到上富集程度逐渐增大。在晚期的钠闪碱流岩中含量最高, 这一点以轻稀土表现最为明显。和球粒陨石比较, La和Ce分别富集了500和400倍。与下伏的长白山玄武岩比较, 这二个元素亦都富集了30多倍。

① 汤德平, 1989, 吉林省白头山火山岩的岩石学研究, 现代地质(待刊)。

表 1 火山岩的微量元素含量
Table 1 Trace element contents of volcanic rocks (ppm)

元素 岩 石 樣 號	τQ_1^+							τQ_2^+							長白山玄武岩						
	τQ_1^+	N3	H07	H08	H12	N4	H14	H17	H19	CTH	TP-2	TP-5	TG-1	TG-5	TJ-1	TJ-7					
La	80.55	99.71	137.30	132.50	132.10	147.30	156.80	181.60	186.40	155.00	4.73	12.45	21.24	9.95	23.53	29.99					
Ce	160.60	198.10	269.60	262.80	261.20	284.00	310.40	357.30	295.80	321.40	11.65	25.82	44.00	21.74	54.62	59.75					
Pr	17.26	19.72	26.51	25.41	26.19	28.50	31.20	35.40	35.75	31.91	1.54	3.30	5.75	3.12	7.35	7.87					
Nd	61.97	74.62	97.68	93.44	98.56	104.50	117.70	130.50	131.80	119.10	8.84	14.36	26.71	15.47	33.96	34.79					
Sm	11.98	14.55	18.95	18.04	19.75	20.36	23.93	26.16	25.44	25.48	2.88	3.55	6.52	5.02	8.72	7.43					
Eu	0.98	0.92	0.84	0.77	1.02	0.85	1.16	1.33	1.25	0.96	1.07	1.52	2.89	1.79	2.71	4.51					
Gd	10.90	13.48	19.75	15.66	19.21	18.04	23.23	25.18	23.24	24.91	3.83	3.90	6.38	5.13	7.97	6.84					
Tb	1.72	1.97	2.38	2.19	2.69	2.90	3.73	3.79	3.63	3.75	0.63	0.64	0.75	0.75	1.01	0.75					
Dy	8.77	10.99	14.42	13.11	15.92	14.14	19.55	20.82	19.18	20.60	3.52	3.43	4.58	3.77	6.02	4.95					
HO	1.70	1.79	2.33	2.17	2.64	2.20	3.10	3.34	3.07	3.40	0.73	0.70	0.85	0.73	1.18	0.93					
Er	4.03	5.26	6.86	5.85	7.80	6.09	8.93	9.52	8.91	9.23	1.73	1.61	1.87	1.39	2.38	2.05					
Tm	0.60	0.69	0.95	0.85	1.16	0.80	1.23	1.31	1.20	1.33	0.26	0.21	0.22	0.18	0.31	0.20					
Yb	3.69	4.84	6.00	5.09	7.03	4.97	7.39	8.42	7.50	7.73	1.58	1.36	1.42	1.09	1.88	1.55					
Lu	0.63	0.59	0.88	0.71	1.17	0.60	1.10	1.39	1.93	1.10	0.37	0.18	0.20	0.25	0.25	0.21					
Y	36.82	47.76	62.88	53.81	74.06	55.33	86.34	89.31	81.03	86.62	15.87	15.17	18.68	13.87	23.30	19.81					
Sc	6.90	7.74	6.45	5.74	8.09	5.91	7.16	8.98	8.17	6.45	17.59	11.41	15.41	12.50	17.16	10.50					
Ba	94.57	34.64	7.45	8.28	11.37	6.99	8.03	7.34	155.6	22.22	55.83	202.2	453.70	204.1	368.60	1818.00					
Be	4.75	6.88	9.28	8.35	6.76	7.76	8.48	11.98	12.25	14.12	3.64	3.11	4.59	3.43	4.14	3.92					
Co	1.76	1.51	1.21	8.52	<1	<1	1.00	1.45	<1	<1	48.99	38.59	38.06	40.13	35.92	28.88					
Cr	5.38	<4	4.84	23.58	4.13	4.78	4.91	4.15	4.92	4.52	157.9	145.8	89.94	117.5	91.92	65.63					
Cu	6.91	6.35	7.01	12.86	6.57	7.47	10.23	11.53	22.59	9.43	51.8	42.85	34.73	44.79	42.18	21.96					
Zn	31.58	34.10	37.11	98.81	39.26	36.95	37.76	37.61	39.65	37.72	17.85	20.58	24.17	22.48	22.12	22.65					
Ga	20.52	8.44	2.94	3.21	3.96	2.84	2.64	2.26	2.97	5.09	171.60	285.6	570.60	344.8	428.10	418.1					
Sr	8.22	10.51	17.50	44.72	14.52	17.44	17.44	21.86	21.22	31.88	3.33	5.20	6.51	5.29	6.66	5.95					
Th	2.20	1.80	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	149.40	141.8	148.8	140.8	138.28	149.4	108.1					
U	125.50	180.60	171.20	168.60	205.60	232.50	259.90	260.20	266.7	251.70	113.40	108.7	111.50	123.20	129.1	113.20					
Zn	78.89	134.60	134.60	134.10	147.10	150.10	147.10	182.60	177.60	202.10	21.67	26.71	31.81	22.24	32.73	35.92					
Nb	842.10	848.60	917.00	782.80	1417.00	1299.00	1362.00	1845.00	1846.00	1783.00	41.82	72.95	114.1	79.70	172.5	119.40					
Zr	13.02	20.36	25.04	26.07	28.08	34.43	36.19	45.74	47.45	56.44	5.30	6.28	6.12	7.04	7.70	5.24					
Li	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	127.80	79.50	63.06	70.49	46.20	46.20					
Ni	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4					

分析者: 中國地質科學院測試所。

图1为白头山火山岩及长白山玄武岩的稀土元素球粒陨石标准化配分型式。图中白头山火山岩稀土元素配分曲线总体表现为向右倾斜，具有明显的Eu负异常。此外，从玄武岩到钠闪碱流岩曲线位置逐渐升高，斜率逐步增大。

Zr、Th、Nb、Y等具有与稀土元素相近的性质，在白头山火山岩中它们的含量都很高。其中以Zr最为突出，最高含量可达1846ppm。

这些不相容元素的另一个特点是元素之间存在良好的线性关系(图2)。笔者用白头山火山岩的各成分点计算了一些元素对之间的回归直线，并绘于图4中。同时还在图上标出了若干长白山玄武岩的成分点。值得注意的是，这些回归直线大都通过或接近通过坐标原点。

2. Li, Be, Zn, Ga

这些元素，尤其是Zn，在白头山火山岩中含量亦较高，在长白山玄武岩—白头山火山岩的岩石系列中表现为有规律地不断富集。但元素间不存在线性关系(图3)。

3. Sc, V, Cr, Ni, Co, Cu

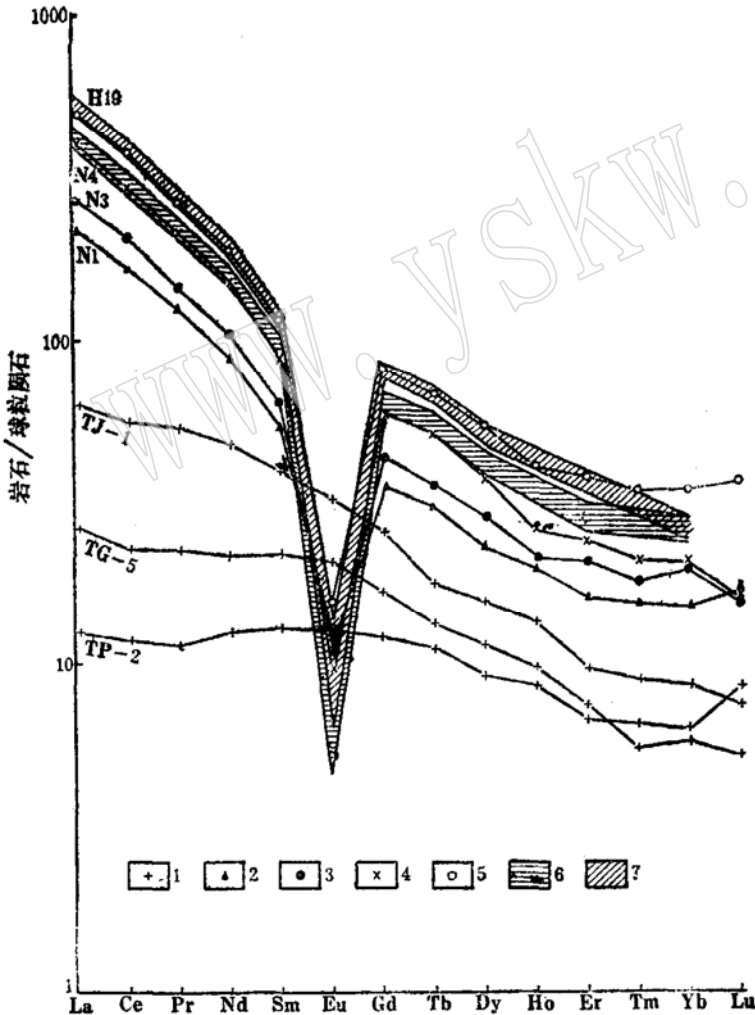


图1 稀土元素配分型式
 Fig. 1 REE element distribution patterns
 1—长白山玄武岩; 2—粗面岩(τQ_1^1); 3—石英粗面岩(τQ_2^1); 4—钠闪碱流岩(τQ_3^1); 5—钠闪碱流岩(τQ_4^1); 6—N1 → N4的计算结果; 7—N4 → H19的计算结果

这些元素在白头山火山岩中含量较低，变化不大，而在长白山玄武岩中含量较高。从长白山玄武岩到白头山粗面岩其含量急剧降低(图3)。图4表示了白头山火山岩的过渡元素

经长白山玄武岩样品标准化后的配分型式。一个晚期长白山玄武岩样品的过渡元素配分型式表现为Cr、Ni 的负异常和Ti 的正异常。从玄武岩向粗面岩演化的阶段，除上述异常的加大外，突出表现为Ti 和V 的降低。钠闪碱流岩的配分型式与粗面岩没有明显的差别，只是使原有的异常稍稍加大。

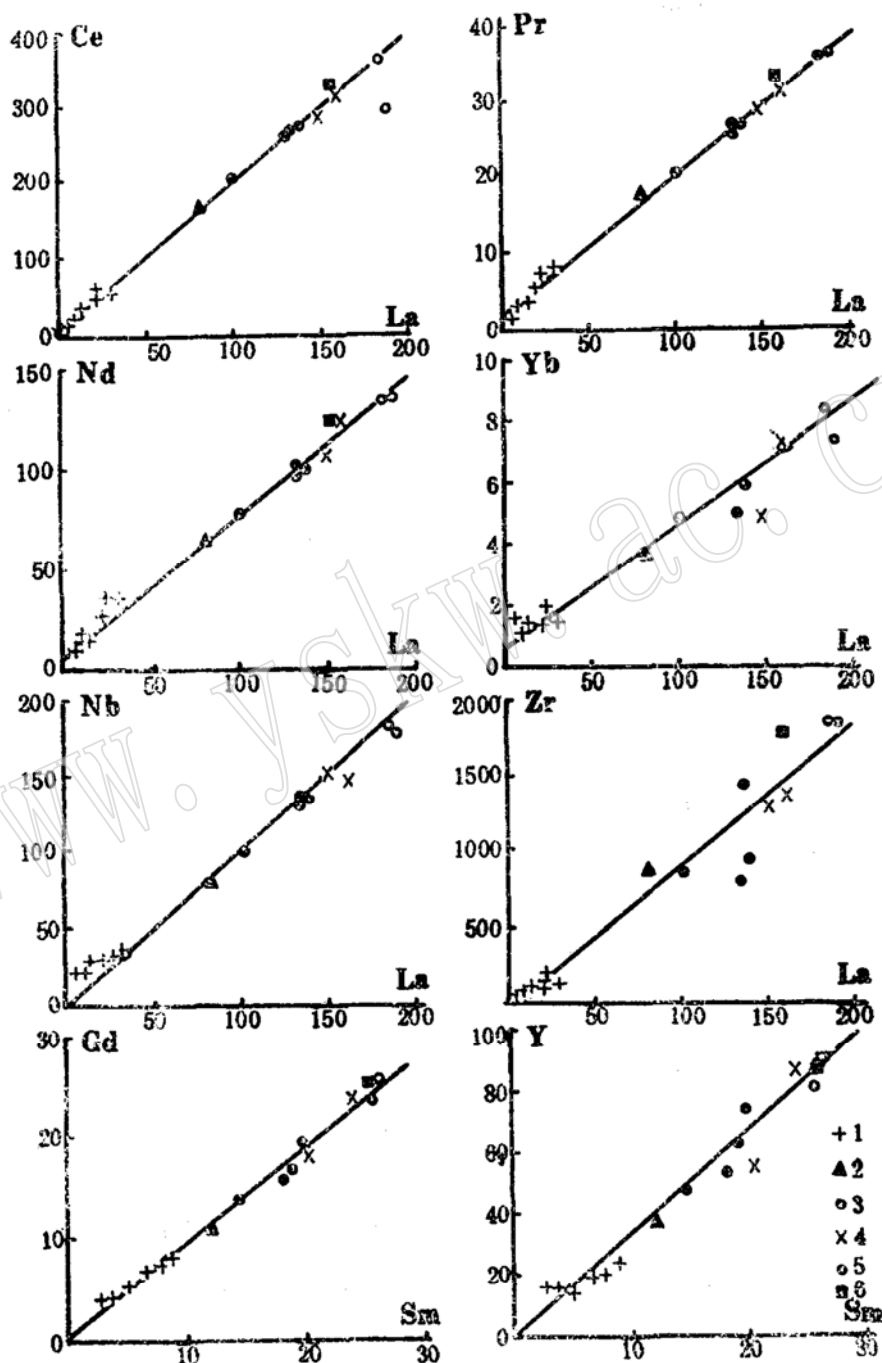


图 2 微量元素之间的线性关系及回归直线

Fig. 2 Linear correlation and regression lines between trace elements

符号1—5同图1，6—钠闪碱流岩质黑曜岩(τQ₄)

4. Ba、Sr

Ba、Sr 在白头山火山岩中极其贫化。在长白山玄武岩中表现为逐渐富集。到了粗面岩

其含量便急剧降低。从粗面岩到钠闪碱流岩仍然趋于贫化。

在白头山火山岩中REE、Zr等不相容元素含量极高，而Ba、Sr等相容元素含量极低。这种元素分布的不均匀性在白头山火山岩的主要成分中也有所表现。如有的钠闪碱流岩中MgO的含量几乎为零^①。

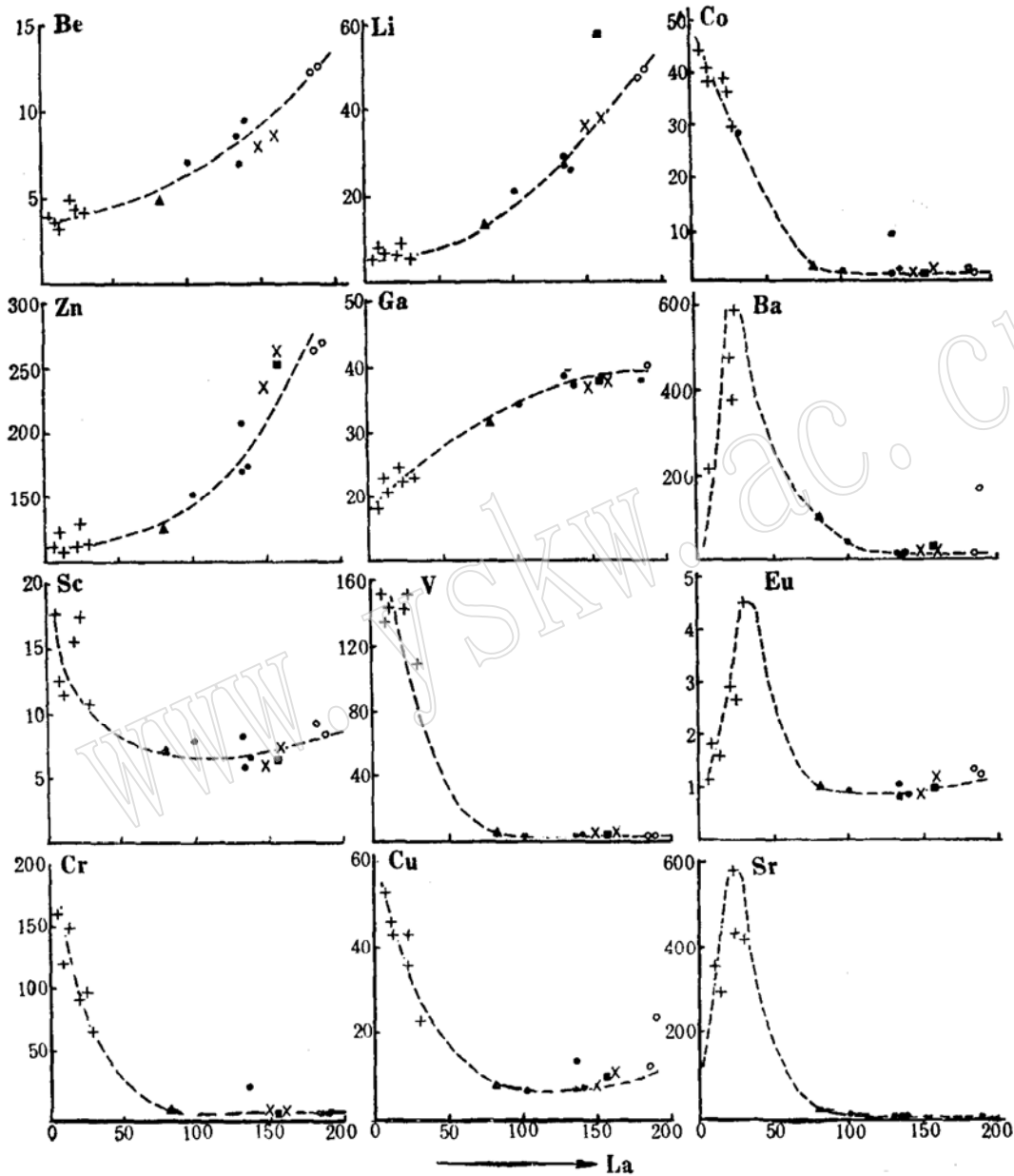


图3 微量元素变异图

Fig. 3 Trace element variation diagrams

符号同图1

① 汤德平, 硕论文。

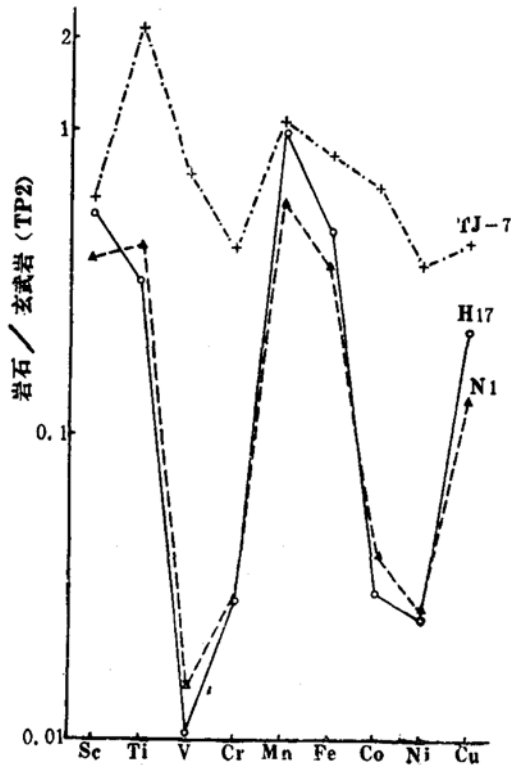


图4 过渡元素配分型式

Fig. 4 Transitional element distribution patterns

符号同图1

三、讨 论

微量元素作为岩石学研究的一个工具已得到日益广泛的应用。笔者试图根据白头山火山岩微量元素的上述特点,对其成因等问题作一些探讨。

1. 弄清白头山火山岩与长白山玄武岩之间的关系是探讨白头山火山岩的成因及其演化的关键问题之一。对它们之间的野外关系,造岩矿物及主要元素的研究说明二者之间有着密切的成因联系^①。微量元素的研究也为此提供了证据。

图1中,玄武岩及白头山火山岩REE配分曲线的变化趋势不仅说明了从下到上各期火山岩中REE含量不断增高的特点,而且清楚地反映出白头山火山岩的REE继承了玄武岩中轻稀土较重稀土逐步富集的特征。这揭示了二者之间存在着某种内在联系。

颇有意义的是,图2中虽然所有回归直线都是用白头山火山岩的成分点计算的,但长白山玄武岩的成分点也都落在该直线的附近。Ferrar和Treuil (1974)⁽⁴⁾指出,一个岩浆系列中湿亲岩浆元素 ($D < 0.01$, 如La、Ce、Nb等)与亲岩浆元素 ($0.01 < D < 1$, 如Sm、Tb、Zr)之间存在的这种线性关系可以作为判别分离结晶作用的一个主要条件。从描述各种岩浆过程中微量元素行为的数学模式出发,可以证明,只有分离结晶作用才可能造成这两类微量元素之间的这种回归直线通过坐标原点的线性关系。而其他岩浆过程,如部分熔融、混合作用等一般不能产生这样的结果,除非二元素的分配系数十分接近或混合的两个相中二元素的比值相等。因此,图2不仅说明了白头山火山岩与长白山玄武岩之间有着密切的成因联系,而且其中的大部分图解还表明分离结晶作用可能是控制从玄武岩—钠闪碱流岩整个岩石系

① 汤德平, 硕士论及。

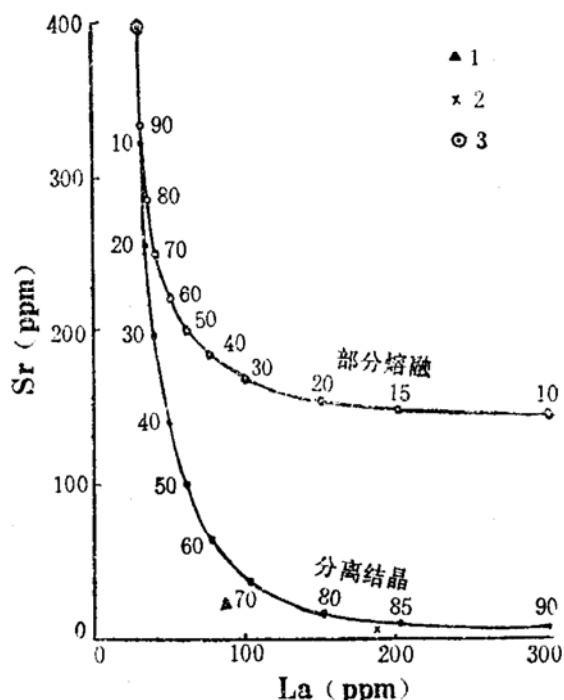


图 5 计算的不同岩浆过程中Sr和La含量变化趋势

Fig. 5 Trends of calculated Sr and La contents in different magmatic processes

1—粗面岩 (N1) 成分点; 2—钠闪碱流岩 (H17) 成分点; 3—初始成分
部分熔融曲线上的数值为熔体的重量百分数即 $F \times 100$;
分离结晶曲线上的数值为分离出的固相的重量百分数 $(1-F) \times 100$

列岩浆演化的主要机理。

2. 关于过碱性酸性岩的成因假说除了分离结晶作用外, 部分熔融也是其中主要的一种。发生部分熔融的源区物质可以是玄武岩, 也可以是地壳的硅铝质物质。白头山过碱性酸性岩中元素含量不均匀的特点对后者作了否定的判断。

为了了解白头山火山岩可能经历的形成和演化过程, 笔者用微量元素的分离结晶模式 $C_i = C_i^0 F^{D_i-1}$ 和平衡部分熔融模式 $C_i = C_i^0 / [D_i + F(1-D_i)]$ (Allègre et al., 1978) (5) 半定量地计算了La和Sr在这二个过程中的含量变化。计算中, 根据长白山玄武岩中La和Sr的含量, 它们的 C_i^0 分别取30ppm和400ppm。La的D一般很小, 故令 $D^{La} = 0$ 。同时, 参考了各矿物Sr的分配系数, 令 $D^{Sr} = 3$ 。当取不同的F值时, 计算结果见图5。图中可见, 即使初始成分完全相同, 分离结晶和部分熔融所产生的结果是截然不同的。对 $D > 1$ 的Sr来说, 即使在部分熔融程度很低的情况下, 也无法产生出Sr含量很低的岩浆, 而分离结晶作用可在残余

表 2 主要氧化物的分离结晶计算结果

Table 2 Calculation of fractional crystallization of major oxides

演化阶段	玄武岩—粗面岩		粗面岩—钠闪碱流岩		钠闪碱流岩		
岩石样号	TJ-5-N1		N1-N4		N4-H19		
矿物名称	矿物比例	总扣除量 (1-F) × 100	矿物比例	总扣除量	矿物比例	总扣除量	
斜长石	55.149	68.092	6.082	52.177		29.701	
碱性长石			88.312				90.553
单斜辉石	15.01		1.333				6.592
橄榄石	22.405		2.192				2.127
铁钛氧化物	7.343		2.079				0.728

岩浆中造成Sr 极其贫化的结果。

白头山粗面岩与钠闪碱流岩的La—Sr 实际成分点都接近于分离结晶的曲线(图5), 并分别相当于长白山玄武岩浆70%和84%的分离结晶。前者与玄武岩—粗面岩演化阶段主要元素的分离结晶混合计算中得出的总扣除量为68%的结果(表2)相近。因此, 上述计算清楚地告诉我们, 类似长白山玄武岩这种源岩的部分熔融不能解释白头山火山岩的成因。花岗质的岩石一般含有更多的Sr、Ba等微量元素, 它们的部分熔融更难以造成Sr、Ba等含量如此之低的结果。

3. 如果长白山玄武岩—白头山火山岩这一岩石系列确实主要与分离结晶作用相联系, 那么在演化的各阶段有哪些矿物相参与了这一作用呢? 一般认为, Cr的贫化主要与单斜辉石的分离结晶有关; Co和Ni趋向于聚集在橄榄石中; 铁钛氧化物则是V的主要赋存矿物; 而Sr、Ba的贫化和Eu异常的出现主要与斜长石和碱性长石的分离有关。因此根据图1—图5中这些元素的变化特点可以推论, 玄武岩的分异可能主要与橄榄石和辉石有关。而在玄武岩向粗面岩演化的阶段, 除橄榄石和辉石外, 突出表现为斜长石以及铁钛氧化物的分离结晶。在白头山火山岩中, 暗色矿物的影响不大, 主要以碱性长石的分离结晶为主。这一推论由该系列岩石的岩相学、矿物学、主要元素化学等实际资料所证实^①; 根据最小二乘法原理对岩石的主要氧化物进行分离结晶定量计算的结果(表2)^②进一步证实了这一点。

在此基础上进行的REE分离结晶定量计算也得到较满意的结果。具体算法是, 从表2中取得不同阶段分离结晶矿物的比例(X_j)和残余岩浆份数 F 。再根据各矿物的分配系数(D_j)资料^{(6) (7)}, 求得固相的总分配系数 $\bar{D} = \sum X_j D_j$ 。将 \bar{D} 、 F 及各阶段初始岩浆的REE含量 C_i^0 代入公式 $C_i = C_i^0 F^{\bar{D}-1}$, 便可求得演化岩浆中各REE的含量。粗面岩—钠闪碱流岩和钠闪碱流岩阶段的计算结果表示于图1中。需要指出的是, 考虑到岩浆成分等因素对 \bar{D} 有较大的影响, 笔者在计算中对非过碱性岩和过碱性岩分别选用了不同的分配系数。另外, 对每个分配系数都根据收集到的资料选取一定的数值范围, 而不是单值。因而得到的结果也是一个含量区间(图1中的划线区)。将它们与实际岩石中的REE含量比较可见, 尤其对含量较高的轻稀土元素来说, 二者之间的吻合还是较好的。

四、结 语

1. 白头山火山岩中许多不相容元素强烈地富集, 其中有些元素之间在长白山玄武岩—白头山火山岩的整个岩石系列中表现出很好的线性关系。与此相反, 一些相容元素则极其贫化。

2. 对该岩石系列中微量元素的含量变化进行定性和定量分析的结果表明, 白头山火山岩是由长白山玄武岩浆分离结晶形成的。从玄武岩—粗面岩的演化阶段可能主要涉及斜长石、铁钛氧化物以及辉石、橄榄岩的分离结晶。而粗面岩—钠闪碱流岩的演化主要与碱性长石的分离结晶有关。

笔者在工作中得到邓晋福教授的精心指导, 中国地质大学(北京)岩浆岩研究室的老师以及中科院地质研究所的刘嘉麒同志都给予了热情的帮助, 在此谨表谢意。

① 汤德平, 硕士论文。

参 考 文 献

- [1] 刘嘉麒, 1983, 长白山地区新生代火山活动的研究, 1981届硕士学位论文集, 北京科学技术出版社, 343—355。
- [2] 方文昌, 1976, 天池碱性火山岩地质学和岩石学特征, 地质科技, 第四期, 63—76。
- [3] 郑祥身, 1983, 长白山地区新生代火山岩的成因演化特征, 1981届硕士学位论文集, 北京科学技术出版社, 258—267。
- [4] Ferrar G. and Treull, M., 1974, Petrological implication of trace element and Sr isotope distribution in basalt—pantellerite series, Bull. Volcan. V38, 548—574.
- [5] Allègre, C. J. and Minster, J. F., 1978, Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes, Earth, Planet. Sci. Lett., 38, 1—25.
- [6] Mahood, G. and Hildreth, W., 1983, Large partition coefficients for trace-elements in high-silica rhyolites, Geochim. Cosmochim. Acta., 47, 11—30.
- [7] Nagasawa, H., 1973, Rare-earth distribution in alkali rocks from Oki-DoGo island, Japan., Contrib. Mineral. Petrol. 39, 301—308.

The Trace Elements of Volcanic Rocks in Baitoushan, Jilin and Their Bearing on Petrogenesis

Tang Deping

(China University of Geosciences)

Tian Feng

(Institute of Geology, Academia Sinica)

Key words: Baitoushan; trachyte; trace elements; peralkaline

Abstract

The volcanic rocks in the Baitoushan volcano mainly include trachyte, quartz trachyte and comendite. They, together with the underlying Changbaishan basalts, constitute a series from basalt to peralkaline acid rocks and have extreme enrichment in some incompatible elements (REE, Zr, Nb, Zn, ect.) but are depleted in some of the others (transitional elements, Sr, Ba ect.). The linear correlation of some pairs of these elements has been observed in the rock series. REE distribution patterns of these rocks display a rightward decline curve with a distinct negative Eu anomaly and gradually rise in their levels and slopes from basalt to peralkaline acid rocks. These features clearly indicate the genetical relationship between the Baitoushan volcanic rocks and underlying basalts. According to the careful study of the features of the trace element models the authors suggest that the fractional crystallization may have played an important role in the origin and evolution of the Baitoushan volcanic rocks. The model of partial melting could not explain the extreme enrichment in some elements but strong depletion in the others in the peralkaline rocks. Mineral phases involving in every stage of the differentiation are estimated by variation of trace elements.