

www.yskw.ac.cn

苏鲁皖新生代玄武岩中巨晶组合 的稀土元素特征

王艺芬 肖增岳

(中国科学院地质研究所)

主题词: 苏鲁皖; 玄武岩; 巨晶组合; 稀土元素分配型式; 分离结晶作用

提 要: 我国东部苏鲁皖地区新生代碱性玄武岩中, 除了含有大量地幔橄辉岩类捕虏体以外, 尚含有一定数量的石榴石、普通辉石和歪长石巨晶。这些巨晶是在地幔不同深度上从玄武岩中晶出的。巨晶组合的分离结晶作用对熔体稀土元素含量有很大影响。赋存巨晶的碱性玄武岩所具有的LREE 富集、HREE 亏损的稀土元素分配型式是由地幔橄辉岩类部分熔融程度、石榴石巨晶和普通辉石巨晶的早期高压熔离和玄武岩的结晶分异作用等综合因素造成的。

中国东部苏鲁皖地区, 新生代玄武岩十分发育, 在晚第三纪—第四纪喷发的碱性玄武岩中, 除了含有大量来自地幔的超镁铁质岩捕虏体以外, 尚含有一定数量的石榴石、普通辉石和歪长石巨晶。这些巨晶在解释深部岩石成因问题中具有重要意义, 可做为碱性玄武岩浆在高压下深部分异作用的特殊见证。因此, 笔者在研究了巨晶成分, 赋存状态和温压条件的基础上, 本文又对这些巨晶的稀土元素特征进行讨论, 并对其表明的成因意义作一简要说明。

一、巨晶组合的物理性质和化学成分

1. 石榴石巨晶

石榴石巨晶在本区比较少见, 主要赋存于安徽当涂斧山、山东蓬莱赤山、西山等地的碱性玄武岩中。晶体多呈橙红色、浑圆形、颗粒大小不一, 一般粒径为 1—2cm。石榴石巨晶的物理参数(见表 1)与镁铝榴石相近, 只是各项数据均偏高, 这可能是由于石榴石巨晶中的铁含量高于镁铝榴石的缘故。

表 1 巨晶组合的物理参数和化学成分

Table 1. Physical parameters and chemical composition of megacryst assemblages

	石 榴 石		普 通 辉 石		歪 长 石				
	1	2	3	4	5	6			
SiO ₂	41.70	42.78	48.60	48.51	66.28	65.51			
TiO ₂	0.51	0.53	0.77	1.25	—	—			
Al ₂ O ₃	21.75	23.68	7.89	8.85	20.81	21.26			
Cr ₂ O ₃	痕	痕	—	—	—	—			
Fe ₂ O	1.60	1.68	4.28	4.95	—	—			
FeO	13.23	12.41	4.60	4.53	0.21	0.19			
NiO	—	—	0.04	0.02	—	—			
MnO	0.53	0.52	0.19	0.17	—	—			
MgO	15.86	14.63	11.20	12.74	0.56	0.74			
CaO	5.09	4.59	20.75	17.22	—	—			
Na ₂ O	—	—	1.77	2.05	7.44	7.79			
K ₂ O	—	—	0.04	0.07	4.88	4.12			
合 计	100.27	100.82	100.13	100.36	100.18	99.61			
端元组份	镁铝分子石榴石 (Pyr)	58.6	58.01	钙契分子马子克 (Ca-Tsch)	14.4	15.3	正分长石子 (Or)	30	26
	铁铝分子石榴石 (Alm)	26.77	27.71				钠分长石子 (Ab)	70	74

续表

		石榴石		普通辉石		歪长石	
		1	2	3	4	5	6
物理参数	折光率 (N)	1.753	1.747		N _p 1.6855 N _m 1.6906 N _g 1.7079		
	比重 (D)	3.784	3.771				
	晶胞参数 (a)	11.566	11.553		a ₀ 9.6396 b ₀ 8.7877 c ₀ 5.2839		
产地	安徽当涂斧山	山东蓬莱赤山	山东蓬莱赤山	安徽嘉山女山	安徽嘉山女山	山东临朐尧山	

注：安徽嘉山县女山普通辉石巨晶的物理参数引自周新民等(1982)^[12]

石榴石巨晶的化学成分(见表1)贫铬而铁含量高,端元组份计算结果属于镁铝榴石—铁铝榴石系列(Pyr54—59 Alm27—28)^[11]。

2. 普通辉石巨晶

普通辉石巨晶比较常见,在本区山东蓬莱赤山、临朐尧山、江苏六合瓜埠山、安徽嘉山县女山、当涂斧山等地均有产出。这些巨晶多呈黑色或褐黑色,次浑园状,粒径一般0.5—2cm,最大者可达8—10cm。其化学成分的突出特点是Al₂O₃含量高,一般为7—9%(见表1),Ca:Mg:ΣFe+Mn=40.6:44.2:15.2,为富铝普通辉石。Al^{IV}较高,多在0.17—0.19范围内,在端元组份中钙契尔马克分子含量为14—16%^[11]。

3. 歪长石巨晶

歪长石是碱性玄武岩中较常见的大晶体,仅不及普通辉石普遍。本区见于安徽嘉山县女山、广德县团山、山东临朐尧山、江苏六合瓜埠山等地。歪长石巨晶多呈洁白色—乳白色,晶体粗大,一般粒径为0.5—1cm。歪长石成分(见表1)为Or20—30 Ab80—70。X衍射结果为高温无序型^[11]。

二、巨晶组合的稀土元素特征

1. 样品及测试方法

送做稀土分析的巨晶样品共7个(其中石榴石巨晶3个,普通辉石巨晶2个,歪长石巨晶2个)。石榴石巨晶样品G₁采自安徽当涂斧山碧玄岩中,颗粒较小,粒径不足1cm。G₂、G₃采自山东蓬莱赤山碧玄岩中,颗粒较大,粒径为1—2cm。普通辉石巨晶A₁采自安徽嘉山县女山霞石岩中,粒径为2cm, A₂采自山东蓬莱西山碧玄岩中,粒径为1.5cm。歪长石巨晶MA₁和MA₂分别采自江苏六合塔山碱性橄榄岩和碧玄岩中。

以上送做分析的样品均用单个巨晶破碎,并去掉了玄武岩和巨晶接触处反应生成的灰黑色外壳,经双目镜下挑选而得,不是混合样。

样品G₁、G₂、A₁、A₂和MA₁是采用色谱分离元素、用等离子光谱测定的;G₃和MA₂是用萃取色谱法分离元素,用等离子光谱测定的。

2. 稀土元素特征

巨晶组合的稀土元素分析结果见表2，为了讨论巨晶和玄武岩的稀土元素丰度比，表2中还给出了赋存巨晶的玄武岩的稀土元素含量和相应的分配系数。所谓分配系数是指在平衡

表2 巨晶组合和玄武岩的稀土元素含量 (ppm)

Table 2. REE contents of megacrysts and alkali basalts (in ppm)

元素 名称 编号	巨 晶							玄 武 岩			分配系数			
	石 榴 石			普通辉石		歪 长 石		碧玄岩	碧玄岩	霞石岩	K _D			
	G ₁	G ₂	G ₃	A ₁	A ₂	MA ₁	MA ₂	(1)	(2)	(3)	G ₁ /(2)	A ₁ /(3)	MA ₂ /(1)	
La	0.12	0.15	0.50	1.92	1.54	2.88	1.95	44.70	72.00	55.50	0.02	0.035	0.044	
Ce	1.10	1.00	1.00	6.80	5.60	4.50	1.00	73.30	122.00	90.50	0.09	0.075	0.014	
Nd	1.20	0.96	0.45	7.40	5.90	1.35	0.50	38.10	48.00	46.30	0.025	0.16	0.013	
Sm	1.30	1.10	1.00	2.30	2.00	0.60	0.20	7.75	3.20	8.23	0.159	0.279	0.026	
Eu	0.87	0.61	0.68	0.96	0.76	0.72	0.42	2.63	2.60	2.92	0.335	0.329	0.160	
Gd	4.40	3.80	3.00	3.10	2.70	0.33	0.15	—	6.30	—	0.698	—	—	
Tb	—	—	0.75	—	—	—	—	1.17	0.81	1.39	—	—	—	
Dy	7.40	8.20	6.00	2.10	1.60	0.69	0.12	—	4.40	—	1.682	—	—	
Ho	—	—	1.02	—	—	—	—	—	0.77	—	—	—	—	
Er	4.10	6.80	4.75	1.22	1.59	0.55	0.09	—	2.00	—	—	—	—	
Tm	—	—	0.80	—	—	—	—	—	0.20	—	—	—	—	
Yb	3.00	7.90	4.75	0.24	0.31	0.64	0.03	1.83	1.20	1.93	2.5	0.125	0.016	
Lu	0.31	1.04	0.88	0.10	0.10	0.10	—	0.21	0.18	0.23	—	—	—	
产 地	安徽省 当涂县 斧山	山东省 蓬莱县 赤山	安徽省 嘉山县 女山	山东省 蓬莱县 西山	江苏省 六合县 塔山	江苏省 六合县 塔山	安徽省 当涂县 斧山	安徽省 嘉山县 女山	安徽省 当涂县 斧山	安徽省 嘉山县 女山	江苏省 六合县 塔山			

体系中，痕量元素在两相间的浓度或活度比。分配系数可在实验室测定，也可以采用斑晶-基质法计算求得。本文分配系数(K_D)是用巨晶稀土元素含量/赋存巨晶的玄武岩的稀土元素含量计算求出的。A. J. Irving 等人(1984)指出，在高压下((10—25) × 10⁸Pa)，大多数辉石和角闪石巨晶与赋存它们的玄武岩是平衡的；而云母、歪长石等巨晶与赋存它们的玄武岩不大可能平衡，它们是从更高程度演化的岩浆中析出的^[8]。由此可见，只有在巨晶和赋存它的玄武岩两相平衡时，才有分配系数可言。为了满足这一平衡条件，笔者送做稀土元素分析的玄武岩样品都经过了认真挑选和处理。首先，赋存巨晶的霞石岩和碧玄岩样品均最大限度地剔除了幔源捕虏体和巨晶，其次，这些岩石均为显微斑状结构或无斑结构，基质为间隐结构。微斑晶为橄榄石和富钙单斜辉石，在基质中分布比较均匀。笔者认为，这样的样品会更逼近与巨晶平衡的液相成分。但是，尽管如此，由于没有实验数据，要确定巨晶和这些玄武岩之间的平衡关系是比较困难的，因此使用分配系数时应该慎重，可以把这些数据做为认识痕量元素分配的参考。表2中巨晶组合和玄武岩的稀土元素含量经球粒陨石标准化后的分配型式分别见图1和图2。

由图1可看出，石榴石巨晶呈轻稀土元素(LREE)明显亏损、而重稀土元素(HREE)明显富集的稀土元素分配型式。(La/Sm)_N = 0.05—0.07, (Ce/Sm)_N = 0.17—0.18, 说明LREE相对MREE。(中稀土元素)是亏损的；(La/Yb)_N = 0.01—0.02, (Ce/Yb)_N = 0.03—0.08, 比值很小, 表明LREE相对HREE极为亏损。K_D值也表现出同样的变化规律，LREE

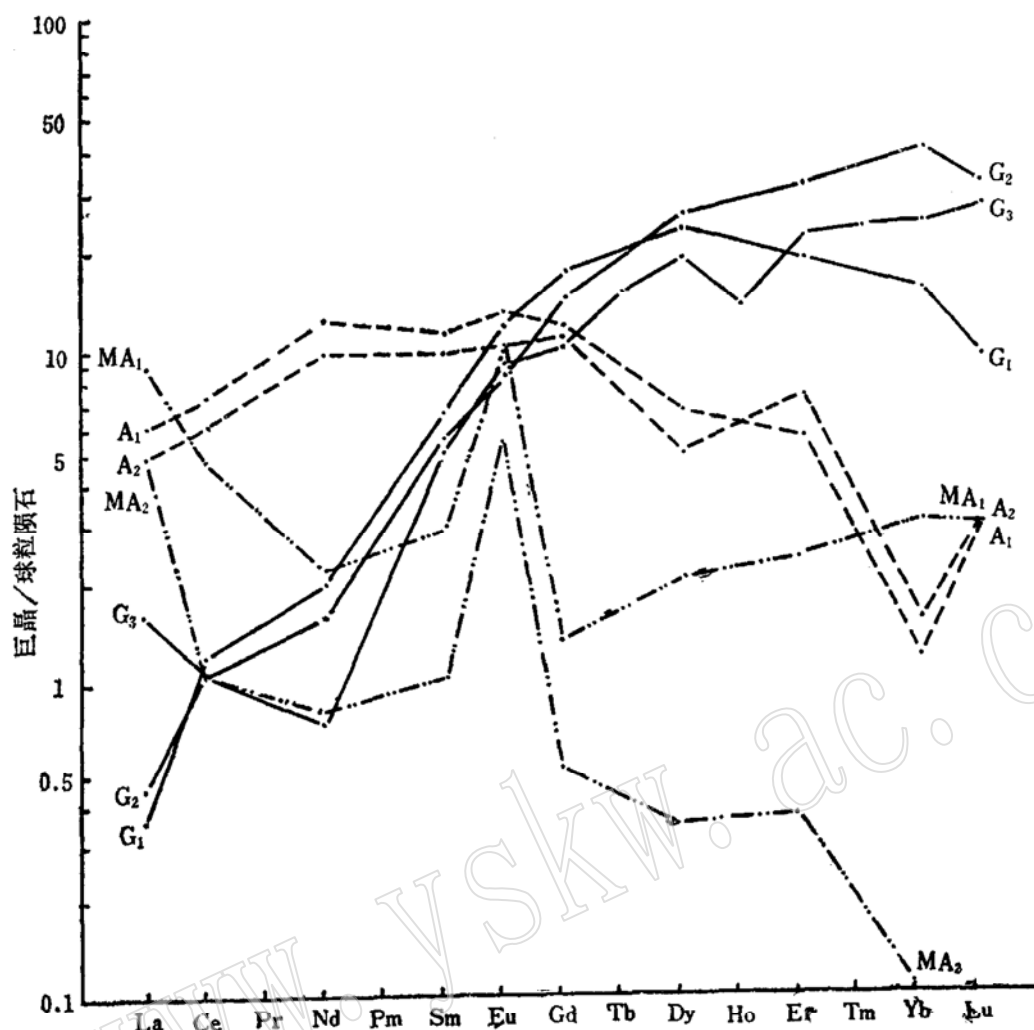


图 1 巨晶组合稀土元素的球粒陨石标准化分配型式

Fig. 1 Chondrite-normalized REE patterns of megacryst assemblages

注：图中符号见表2

的 K_D 值很小,从La—Sm为0.002—0.159, HREE的 K_D 值逐渐增大,从Eu—Yb由0.355—2.5,与稀土元素丰度吻合得很好。

普通辉石巨晶的稀土元素分配型式是LREE和HREE都有不同程度的亏损。相对LREE而言, HREE亏损更为明显,而MREE相对富集。 $(La/Sm)_N = 0.4—0.57$, $(Ce/Sm)_N = 0.58—0.95$,说明LREE相对MREE是亏损的; $(La/Yb)_N = 3—16$, $(Ce/Yb)_N = 4—27$,说明HREE相对LREE亏损比较明显。普通辉石巨晶的 K_D 值从La到Eu是逐渐增加的,从0.135—0.329,而 $K_{D(Yb)}$ 变小(0.125),也表现出MREE富集的趋势。

歪长石巨晶稀土总量很小($\Sigma REE = 4—12$), K_D 值也很小(见表2)。突出特点是Eu富集,为了表述由于Eu的价态变化($Eu^{3+} \rightarrow Eu^{2+}$)而引起的元素富集或亏损,国外通常用 Eu/Eu^* 表示,其中Eu为岩石或矿物中实测的Eu浓度, Eu^* 为Eu的标准含量,是由岩石或矿物中Sm和Gd的含量/球粒陨石中Sm和Gd的含量而推算出来的。根据 Eu/Eu^* 的数值可以判断Eu的富集或亏损程度。本区歪长石巨晶的 Eu/Eu^* 为4—7,说明Eu是富集的。

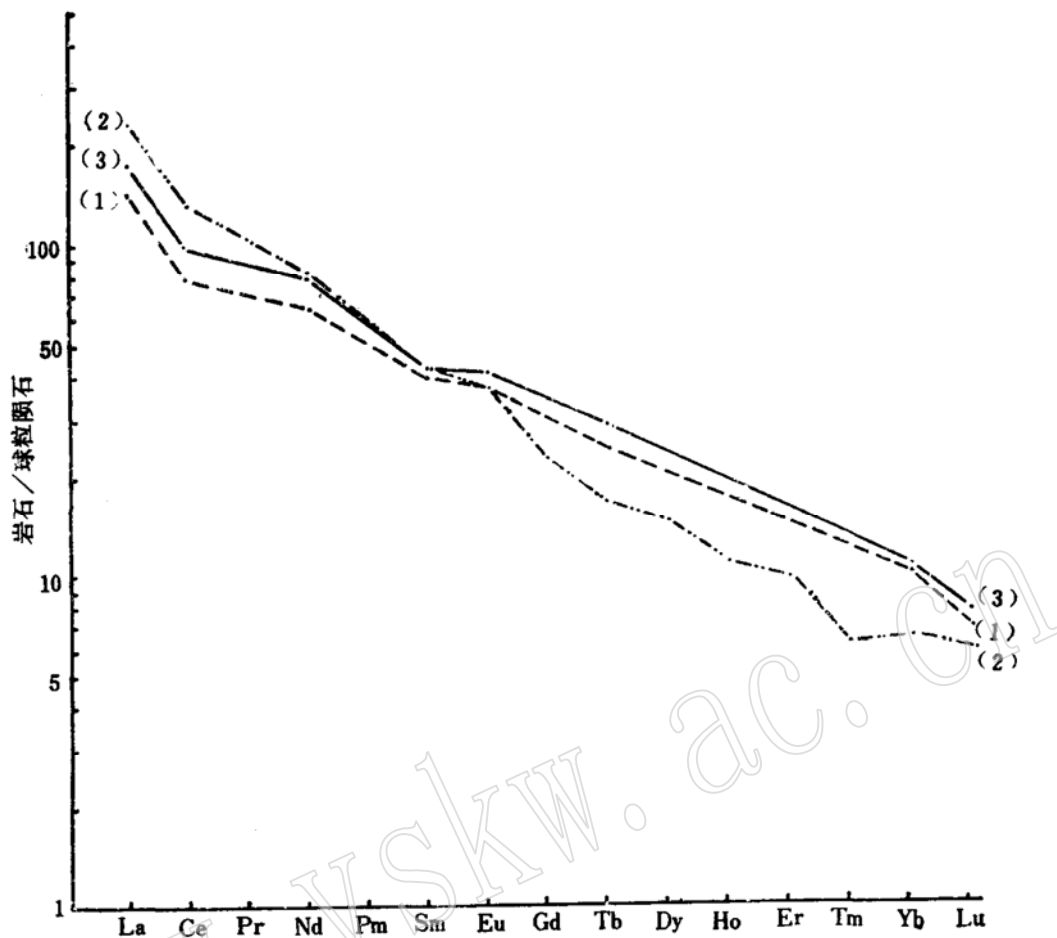


图2 碱性玄武岩稀土元素的球粒陨石标准化分配型式

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of alkali basalts

注：图中符号见表2

三、讨论

苏鲁皖地区的碱性玄武岩是由地幔超镁铁岩（橄辉岩类）较低程度的部分熔融产生的熔体喷发至地表而形成的。关于这一观点，已被广泛接受。本区含超镁铁岩捕虏体和巨晶的玄武岩显示出LREE富集而HREE亏损的分配型式（见图2），这种分配型式除与地幔橄辉岩部分熔融程度有关外，与玄武岩浆的分离结晶作用、特别是高压熔离作用有直接关系。

如前所述，石榴石巨晶属镁铝—铁铝石榴石系列。霞石玄武岩和其他碱性玄武岩的许多熔融实验和相平衡研究（Кепежинская, 1979）表明⁽⁴⁾，只有在 $P \geq 17 \times 10^8 \text{ Pa}$, $T > 900^\circ \text{C}$ 时，石榴石巨晶和熔体才稳定，也就是说石榴石巨晶至少在60km的深度上才能形成。在石榴石成因分类图（ $\text{Ca—Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$ ）上⁽¹⁾，石榴石巨晶与金伯利岩和玄武岩中的组I榴辉岩（由绿辉石+石榴石组成）捕虏体中的石榴石相似。据Davis等人（1966）的实验资料⁽⁵⁾，南非巴苏陀兰金伯利岩中二矿物榴辉岩的形成条件为 $30 \times 10^8 \text{ Pa}$, $1000\text{—}1300^\circ \text{C}$ ，相当100km的深度，由此可推测石榴石巨晶形成的最大深度也在100km左右。可以认为石榴石巨晶是从玄武岩熔体中高压熔离的最初矿物相。

众所周知，石榴石是HREE的主要赋存相。因此导致玄武岩中HREE极度亏损的原因可

能有以下两个方面：一是部分熔融后的残留地幔中仍有石榴石这个矿物相，使HREE保留在地幔中，而没有进入熔体；二是由于石榴石巨晶早期高压熔离从熔体中带走了部分HREE，使熔体中HREE更加亏损。

普通辉石巨晶也是从玄武岩中早期高压熔离的矿物相。Green和Hibberson (1970)^[4]在1200℃、(14—16)×10⁸Pa条件下，从含水约2%的天然碱性橄榄岩熔体中结晶出的矿物相成分接近于富铝普通辉石的实验，也证明了辉石巨晶这种成因的可能性。R. N. Thompson (1974)^[6]曾用富橄榄石的碱性玄武岩人工合成高压普通辉石，并推导出Al与P、T关系的经验公式($P(10^8\text{Pa}) = -7.5382 + 83.1692Al$, $T(^{\circ}\text{C}) = 1056.8986 + 902.7928Al$)。由该公式计算出本区普通辉石巨晶的结晶条件为1353—1436℃、 $P = (19—27) \times 10^8\text{Pa}$ ，由此可推测普通辉石巨晶的形成深度大致为60—90km。

普通辉石巨晶的LREE和HREE均亏损，而MREE相对富集。因此，辉石巨晶的晶出则导致熔体的LREE富集，而MREE亏损，与现有的玄武岩稀土元素分配模式是一致的。

歪长石巨晶为高温无序型，可见歪长石巨晶可形成于高温条件。但实验表明，歪长石在 $10 \times 10^8\text{pa}$ 条件下即开始不一致熔融，推测其形成条件是相当于莫霍面附近的深度。尽管在有些地区歪长石巨晶可以与石榴石或普通辉石巨晶共生，但歪长石是一个相对低压的矿物相。

歪长石巨晶对熔体REE的影响较小，因其Eu含量高，因此，它的晶出可造成熔体中Eu亏损。然而，赋存巨晶的玄武岩中Eu/Eu*比较接近于1，表明熔体中Eu并未表现出明显异常，这可能是由于石榴石和普通辉石巨晶的结晶分离以及橄榄石和富钙单斜辉石斑晶的晶出造成的。它们的存在可使熔体中Eu富集，在一定程度上抵消了歪长石巨晶给熔体造成的Eu负异常，使熔体Eu/Eu*比值不表现出明显的升高或降低。

综上所述可见，这些巨晶是在深部相应的地幔不同深度上结晶的，石榴石和普通辉石巨晶是玄武岩浆深部结晶作用的最初相，这两种巨晶具有特殊的化学成分和反映较高压力的端元组份，和玄武岩中的斑晶及捕虏体中的同类矿物显著不同。如前所述，本区含巨晶的碱性玄武岩类的主要矿物相为橄榄石、富钙单斜辉石和极少量的斜长石。橄榄石的存在对熔体REE的影响不大。斜长石除Eu正异常外，对熔体REE也只有微小影响。富钙单斜辉石虽然对熔体REE影响较大，但由于斑晶的颗粒小，数量仅10%左右。因此，这个斑晶组合的晶出对熔体REE的影响是有限的。笔者认为赋存巨晶的玄武岩所具有的这种LREE富集、HREE亏损的稀土元素分配型式是由地幔橄榄岩的部分熔融程度、高压巨晶的熔离和玄武岩浆的结晶分异作用等综合因素造成的。

本文巨晶组合稀土元素分析中G₁、G₂、A₁、A₂、MA₁样品是由北京大学地质学系研究生张有学在美国哥伦比亚大学测定的；G₃、MA₂由中国科学院地质所伊丽莹完成。巨晶组合的主元素成分及玄武岩的稀土元素分析由中国科学院地质所九室完成。在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 王艺芬、赵大升、肖增岳，1984，华东及邻区中生代火山岩。269—280页，科学出版社。
- [2] 周新民、陈图华、刘昌实、薛纪越，1982，我国东南沿海碱性玄武质岩石中的辉石和角闪石巨晶。矿物学报，第1期，13—20页。

- [3] Irving, A. J., Frey, A. F., 1984. Trace element abundances in megacrysts and their host basalts: Constraints on partition coefficients and megacryst genesis. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 48, 1201-1221.
- [4] Кебезинская, В. В., 1979, Кайнозойские щелочные базальтоиды Монголии и их глубинные включения, «наука» Хэвлэдин Газар, Москва.
- [5] Davis, B. T. C., Boyd, F. R., 1966. The joint $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ at 30 kbar pressure and its application to pyroxenes from Kimberlites. *J. Geophys. Res.*, vol. 71, 3567-3576.
- [6] Thompson, R. N., 1974. Some high-pressure pyroxenes. *Miner. Mag.*, vol. 39, 768-787.

REE Characteristics of Megacryst Assemblages in Alkali Basalts of Jiangsu-Shandong-Anhui Area

Wang Yifen, Xiao Zengyue

(Institute of Geology, Academia Sinica)

Key words: Jiangsu-Shandong-Anhui; basalt; megacryst assemblage; REE distribution pattern; fractional crystallization

Abstract

The megacrysts discussed in this paper occur in Cenozoic alkali basalts of Jiangsu-Shandong-Anhui area. Garnet megacrysts belong to pyrope-almandine series, while monoclinic pyroxene megacrysts are of aluminous augites. Both megacrysts were formed through early crystallization of basaltic magma at high pressure. In contrast, the anorthoclase megacrysts seem to be of a relatively low pressure phase.

Seven megacryst samples were analyzed for REE. The garnet megacrysts are characteristically rich in HREE, and the chondrite-normalized patterns show that $(La/Yb)_N$ ratio and $(Ce/Yb)_N$ are respectively 0.01-0.02 and 0.03-0.08. Fractional crystallization of the garnets caused HREE depletion in the melt. The augite megacrysts contain higher MREE, lower LREE and lowest HREE, with $(La/Yb)_N$ ratio and $(Ce/Yb)_N$ being respectively 3-16 and 4-27. The augites led to MREE depletion and LREE enrichment in the basaltic magma. The anorthoclase megacrysts show relatively high positive Eu anomalies, Eu/Eu^* ratio being 4-7. Their crystallization gave rise to slight negative Eu anomalies in the melt. The patterns of megacryst/melt REE partition coefficients are consistent with chondrite-normalized REE patterns of megacrysts.

It can be concluded from the above discussion that REE distribution patterns of LREE enrichment and HREE depletion in alkali basalts are caused jointly by degree of partial melting, fractional crystallization of megacrysts and differentiation of basaltic magma.