吉林陨石全岩及其球粒中稀土元素分布的初步研究

宗普和

（中国科学院贵阳地球化学研究所）

稀土元素，由其物理与化学性质所决定，使得它们在某些地球化学和宇宙化学过程中，或作为一个整体运移，或其相对丰度模式灵敏而有规律地变化．因此测定陨石、月球和地球物质中稀土元素的绝对丰度和相对丰度，往往可以为了解太阳系原始物质的化学组成提供宝贵资料，或为人们提供有关陨石母体、月球和地球形成和演化历史中所发生的地球化学和宇宙化学过程的规模和性质的情报．使得它们成为某些地球化学和宇宙化学过程的重要而灵敏的指示剂．

为了对吉林陨石基质和球粒的形成机制，陨石母体形成和演化历史有进一步的了解，我们与中国科学院原子能所合作，利用放射化学分离中子活化分析方法，对吉林陨石全岩中磁性和非磁性部分及其球粒中稀土元素的含量进行了系统地分析．同时为了检验分析方法的可靠性，也对国际标准参考物 Allende 陨石全岩中稀土元素的含量进行了系统地分析．分析结果见表 1．分析方法的详细情况准备另外发表．

结 果 讨 论

由表 1 所列的分析结果可得出如下结论：

1. 用本方法对 Allende 陨石全岩中稀土元素含量分析的结果，在实验误差范围内与文献报道的数值符合得很好，说明本方法是可靠的．

2. 吉林陨石非磁性部分的稀土元素的含量一致地比磁性部分高一倍左右，显示出稀土元素的明显亲石性．

3. 吉林陨石和 Allende 陨石全岩中 14 个稀土元素的相对含量与国际上 20 个球粒陨石的平均稀土元素的相对含量相比，在实验误差范围内基本上相等，说明吉林陨石和 Allende 陨石及它们的母体在形成和演化过程中，并未经历过使 14 个稀土元素发生相对分馏的过程（见图 1）．

4. 吉林陨石球粒中稀土元素总量比起全岩约低 34%，14 个稀土元素的相对含量与国际上 20 个球粒陨石的平均稀土元素相对含量相比，轻稀土元素的含量显示出明显的线性匮乏，即这种匮乏与其离子半径成正比，相邻两个稀土元素 Sm 和 Eu 的比值明显低于全岩．说明吉林陨石球粒中稀土元素发生了明显的化学分馏（图 2 c）．

5. 把吉林陨石（H_5 型）球粒中稀土元素丰度模式与 Schmitt 等人[2] 于 1968 年对 Mokoia (C-III)，Chaipur (LL-3)，Forest-City (H_5)，Richardton (H_5) 四个陨石球粒所测得的稀土元

本文 1979 年 8 月 17 日收到．

表 1　吉林陨石全岩及其球粒中稀土元素的含量 (ppm)

元素	吉林陨石磁性	吉林陨石非磁性	吉林陨石全岩		吉林陨石球粒		Allende（本工作）		Allende*	20个球粒陨石平均**	
La	0.24±0.03	0.45±0.02	0.39±0.02	1.90	0.21±0.03	1.06	0.53±0.06	1.72	0.51±0.03	0.30±0.06	1.72±0.17
Ce	0.520±0.001	1.2±0.1	1.0±0.1	4.77	0.58±0.07	2.98	1.4±0.1	4.43	1.30±0.07	0.84±0.18	5.02±0.40
Pr	0.063±0.009	0.14±0.01	0.11±0.01	0.56	0.081±0.005	0.42	0.22±0.03	0.70	0.21±0.01	0.12±0.02	0.70±0.11
Nd	0.47±0.03	0.83±0.09	0.69±0.07	3.29	0.36±0.04	1.85	1.04±0.01	3.39	0.97±0.05	0.58±0.13	3.32±0.34
Sm	0.113±0.06	0.22±0.01	0.20±0.01	0.94	0.13±0.02	0.66	0.32±0.02	1.04	0.34±0.02	0.21±0.04	1.17±0.09
Eu	0.039±0.001	0.092±0.007	0.076±0.005	0.38	0.083±0.005	0.43	0.105±0.002	0.34	0.10±0.01	0.074±0.015	0.43±0.05
Gd	0.15±0.02	0.35±0.03	0.30±0.02	1.45	0.191±0.008	0.98	0.51±0.03	1.67	0.42±0.02	0.32±0.07	1.84±0.02
Tb	0.032±0.003	0.061±0.007	0.054±0.005	0.26	0.035±0.004	0.18	0.076±0.007	0.25	0.08±0.01	0.049±0.010	0.29±0.04
Dy	0.18±0.02	0.43±0.03	0.36±0.02	1.75	0.30±0.02	1.55	0.50±0.06	1.63	0.42±0.02	0.30±0.07	1.75±0.20
Ho	0.052±0.007	0.109±0.008	0.095±0.007	0.45	0.062±0.005	0.32	0.112±0.009	0.37	0.10±0.01	0.073±0.014	0.42±0.05
Er	0.14±0.02	0.32±0.03	0.28±0.02	1.32	0.225±0.005	1.16	0.31±0.01	1.02	0.29±0.02	0.21±0.04	1.23±0.15
Tm	0.027±0.002	0.046±0.002	0.042±0.002	0.20	0.038±0.002	0.19	0.053±0.001	0.17	0.05±0.01	0.033±0.007	0.18±0.02
Yb	0.110±0.008	0.24±0.02	0.21±0.02	1.00	0.19±0.02	1.00	0.31±0.02	1.00	0.31±0.02	0.17±0.03	1.00
Lu	0.016±0.009	0.038±0.005	0.033±0.004	0.16	0.032±0.001	0.17	0.047±0.001	0.15		0.031±0.005	0.18±0.02
∑REE	2.15	4.53	3.84		2.52		5.40		~5.10	3.31	
Sm/Eu	2.9	2.4	2.6		1.6		3.0		3.4	2.8	

* Martin, P. M. & Mason, B., *Nature*, **249** (1974), 333—334.

** Haskin, L. A., Frey, F. A., Schmitt, R. A. & Smith, R. H., in *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 7(Ahrens, L. H. ed.),Pergamon press, 1966, 167—321。

表 2　陨石球粒中稀土元素的绝对和相对含量（ppm）

元素	Mokoia (C-III)		Chainpur (LL-III)		Forest-City (H_5)		Richardton (H_5)		吉林-球粒 (H_5)		20个球粒石平均相对含量
	绝　对	相对	绝　对	相对	绝　对	相对	绝　对	相对	绝　对	相对	
La	0.60±0.03	1.33	0.29±0.02	1.53	0.13±0.01	0.78	0.14±0.01	0.93	0.21±0.03	1.06	1.72±0.17
Ce	1.64±0.18	3.64	0.84±0.08	4.42	0.48±0.08	2.88	0.49±0.07	3.27	0.58±0.07	2.98	5.02±0.40
Pr	0.30±0.02	0.67	0.14±0.01	0.74	0.079±0.004	0.47	0.071±0.005	0.47	0.081±0.005	0.42	0.70±0.11
Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	0.36±0.04	1.85	3.32±0.34
Sm	0.44±0.01	0.98	0.191±0.006	1.00	0.141±0.003	0.84	0.124±0.003	0.83	0.13±0.02	0.66	1.17±0.09
Eu	0.158±0.004	0.35	0.061±0.001	0.32	0.089±0.002	0.53	0.082±0.002	0.55	0.083±0.005	0.43	0.43±0.05
Gd	0.52±0.10	1.16	0.28±0.07	1.47	0.29±0.04	1.74	0.22±0.04	1.47	0.191±0.008	0.98	1.84±0.02
Tb	—	—	—	—	—	—	—	—	0.035±0.004	0.18	0.29±0.04
Dy	0.75±0.05	1.67	0.34±0.02	1.79	0.23±0.03	1.38	0.22±0.02	1.47	0.30±0.02	1.55	1.75±0.20
Ho	0.145±0.006	0.32	0.068±0.04	0.36	0.052±0.002	0.31	0.054±0.004	0.36	0.062±0.005	0.32	0.42±0.05
Er	0.50±0.06	1.11	0.22±0.03	1.16	0.17±0.02	1.02	0.16±0.02	1.07	0.225±0.005	1.16	1.23±0.15
Tm	0.073±0.005	0.16	0.036±0.004	0.19	0.029±0.005	0.17	0.029±0.003	0.19	0.038±0.002	0.19	0.18±0.02
Yb	0.45±0.02	1.09	0.19±0.01	1.00	0.167±0.005	1.00	0.150±0.006	1.00	0.19±0.02	1.00	1.00
Lu	0.069±0.004	0.15	0.030±0.004	0.16	0.026±0.003	0.16	0.025±0.003	0.19	0.032±0.001	0.17	0.18±0.02
∑REE	5.6		2.7		1.9		1.8		2.5		
Sm/Eu	2.8±0.1		3.1±0.1		1.5±0.1		1.5±0.1		1.6±0.1		

素丰度模式相对照，发现球粒中轻稀土元素含量的相对匮乏随陨石变质程度的加深而变得明显(表 2、图 2).

考虑到球粒中稀土元素的相对分馏与变质程度的关系，我们倾向于认为球粒中稀土元素的相对分馏可能是在陨石母体后期热变质过程中，稀土元素由球粒向周围基质迁移的结果.但这种迁移的机制可能不是简单的固体扩散，因为固体扩散一定是从高浓度向低浓度方向扩散，一直到浓度梯度消失为止，而决不可能相反. 事实上，球粒中的稀土元素的浓度低于其周围基质的浓度. 另外，单纯的固体扩散其扩散率应与离子半径成反比，这与球粒中稀土元素的相对匮乏与离子半径成正比的实验结果矛盾.

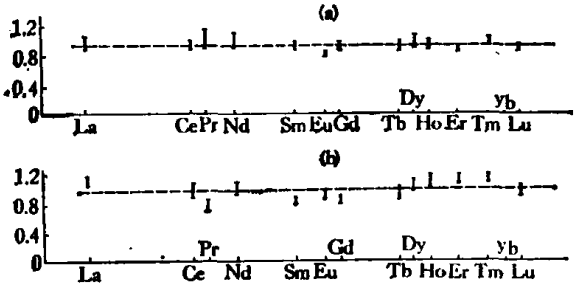

图 1　Allende 陨石全岩 (a)，吉林陨石全岩 (b) 中稀土元素相对丰度与 20 个球粒陨石稀土元素的平均相对丰度的比较图

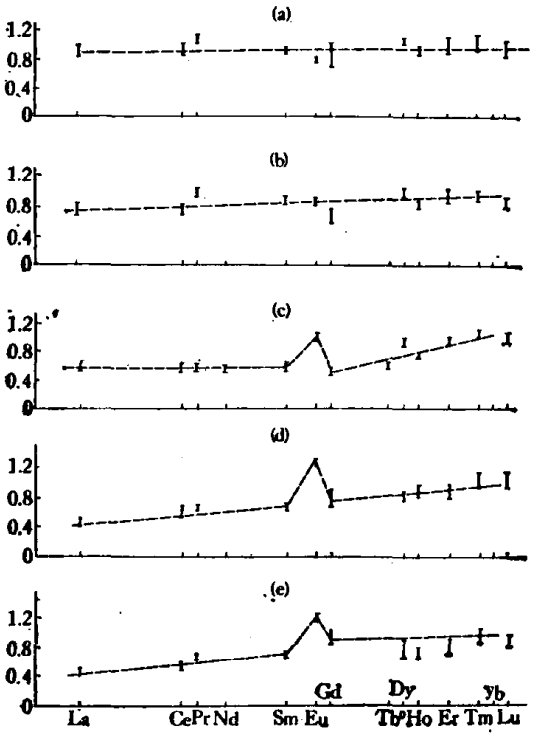

图 2　陨石球粒中稀土元素相对丰度与 20 个球粒陨石稀土元素的平均相对丰度的比较图

(a) Chainpur (LL-III) 陨石; (b) Mokoia (C-III) 陨石; (c) 吉林陨石 (H_5); (d) Richardton (H_5) 陨石; (e) Forest-City (H_5) 陨石

其他方面的研究证明，至少有相当一部分球粒在形成过程中由于快速冷凝而经历过玻璃质阶段，在后期的热变质过程中，这些玻璃质球粒经脱玻璃化重结晶而形成结晶较好的球粒. 在这个过程中，可能由于结晶的自纯化作用(陨石母体小的冷却率——1—5°/百万年，极有利于这种纯化作用)，把这些稀土元素作为杂质排斥到周围的基质中去. 而且，与球粒中造岩矿物——铁镁硅酸盐中的金属离子 Fe^{+2}($r = 0.83$ Å)，Mg^{+2}($r = 0.78$ Å) 大小相差较远的轻稀土元素被排出球粒的量就多，造成了球粒中轻稀土元素的含量随陨石母体变质程度的加深而呈现越发明显地相对匮乏. 其中 Eu 在高度还原条件下，往往以二价离子存在，容易被留在球粒的硅酸盐矿物中，故 Eu 相对于其相邻元素在球粒中匮乏较少.

基于以上讨论，对于球粒陨石及其球粒的形成和演化，我们有如下认识:

(1) 球粒先于陨石母体而形成，其中有相当部分是由太阳星云物质经高温熔融后快速冷凝而先形成玻璃质球粒. 在这个过程中，由于冷却速度很大，稀土元素是以原始宇宙丰度保留在玻璃球粒中，并未发生明显的相对分馏.

(2) 这些玻璃质球粒为基质物质所包围聚集成陨石母体，它们在陨石母体的后期加热——极缓慢冷却(即热变质)过程中，经脱玻璃化重结晶，演化成结晶较好的球粒. 作为杂质存在的稀土元素按其离子半径大小被逐渐排出球粒，使球粒的化学组成更单纯化了.

致谢: 本文曾得到欧阳自远同志的帮助和指导，在此表示感谢.