

我国金伯利岩稀土元素特征

董振信

(中国地质博物馆, 北京 100034)

主题词 金伯利岩 稀土元素

提 要 我国山东、辽宁、贵州、山西及河北金伯利岩的稀土总量很高, 且变化大。金伯利岩中稀土的球粒陨石标准配分模式为简单的较平滑的线, 属 LREE 极富集型。不同岩体 REE 含量和配分模式的差异与部分熔融程度、地幔的非均一性、金伯利岩浆早期结晶的石榴石巨晶矿物的含量、壳源物质的混染作用、岩浆中挥发份含量及岩体的产状有关。钙钛矿是金伯利岩中主要的稀土载体矿物, 次为磷灰石。

我国对金伯利岩稀土元素特征的研究资料报导很少, 尤其金伯利岩中矿物稀土元素特征方面的研究资料, 几乎还是空白。本文对山东、辽宁、贵州、山西和河北金伯利岩及其钙钛矿、磷灰石、云母、镁铝榴石及铬尖晶石矿物的稀土含量和配分模式进行了研究。探讨了金伯利岩 LREE 极富集型的配分模式形成机理, 指出了不同产状及云母含量不同的岩石类型的稀土元素地球化学特征, 还讨论了导致金伯利岩体之间稀土元素地球化学特征差异的因素。

1 稀土总量及其变化

我国金伯利岩中的 Σ REE 很高, 变化大 (表 1)。富云母斑状金伯利岩比斑状金伯利岩的 Σ REE 高。如贵州富云母斑状金伯利岩 Σ REE 1209.7—1473.24 (ppm)。国外也有类似情况, 像南非的 Bellsbank 岩体中的富云母金伯利岩, Σ REE 高达 4195 (ppm)⁽¹⁾。另外, 富云母的金伯利岩中的 LREE 比含云母少的金伯利岩含 LREE 高, 但它们的 HREE 没有明显的差异。这也可能与形成含云母金伯利岩的岩浆中富含挥发份, 促使 LREE 更加富集有关。

岩脉状的浅成金伯利岩比岩管状的金伯利岩 Σ REE 高 (表 1)。造成这种情况的原因有二: 一方面是由于岩脉相金伯利岩的结晶封闭系统阻止了携带稀土元素的挥发份的损失; 另一方面是由于岩管相金伯利岩成分复杂, 含有较多的贫 REE 的物质引起的。

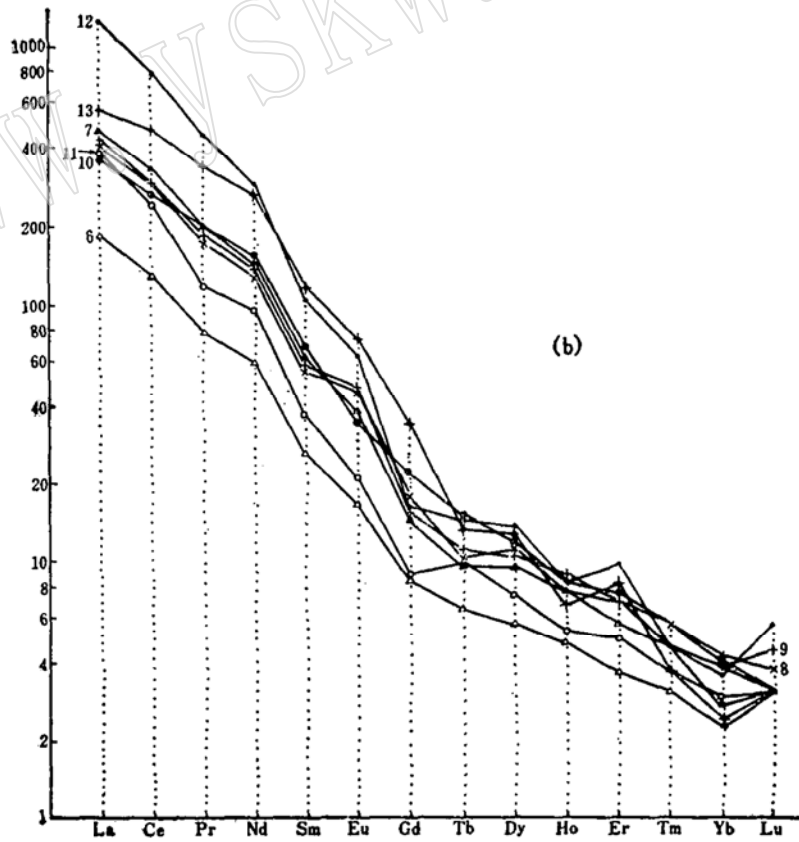
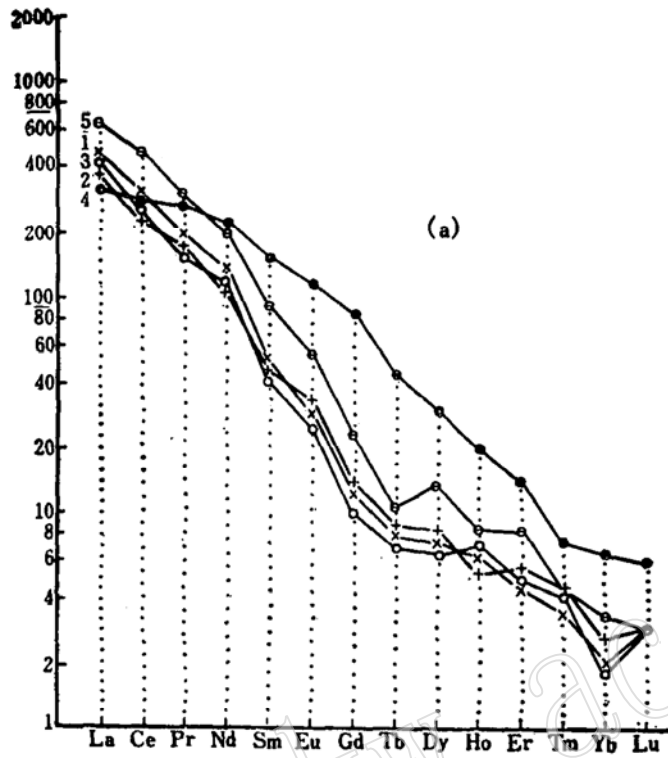
2 稀土配分模式

我国金伯利岩 REE 的球粒陨石标准配分模式为简单的较平滑的线, 为 LREE 极富集型 (图 1)。La 的含量为球粒陨石的 181—1188 倍, 而 Sm 的含量为球粒陨石的 17—161 倍。我国金伯利岩 HREE 为球粒陨石的 3—11 倍。La/Yb 变化范围为 73.16—517.5,

表 1 我国金伯利岩中的稀土元素含量 (ppm)
Table 1 Rare earth element contents for kimberlites from China

顺序号	产地	岩体	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
1		胜利 1 号	多斑状金伯利岩	146.00	243.20	22.60	79.41	10.37	2.42	2.95	0.37	2.40	0.43	0.99	0.12	0.43	0.10	511.79
2		胜利 1 号	斑状金伯利岩	119.30	207.70	19.46	71.16	10.06	2.45	3.62	0.40	2.67	0.37	1.11	0.14	0.57	0.10	439.11
3		红旗 1 号	斑状金伯利岩	124.20	226.90	20.36	71.48	9.24	2.23	2.85	0.35	2.36	0.45	1.01	0.14	0.39	0.10	462.06
4	山东	红旗 1 号	细粒金伯利岩	95.84	233.00	31.32	140.70	29.97	8.46	21.4	2.13	10.3	1.46	3.04	0.24	1.31	0.20	579.37
5		红旗 1 号	细粒金伯利岩	214.90	392.50	36.86	133.60	17.91	4.38	6.15	0.53	4.33	0.62	1.79	0.15	0.74	0.10	814.56
6		50 号	斑状金伯利岩	57.84	104.10	9.54	35.03	5.08	1.21	2.20	0.3	1.79	0.34	0.76	0.10	0.51	0.1	218.9
7		50 号	含岩球斑状金伯利岩	139.90	259.60	24.30	87.61	11.80	2.82	3.81	0.47	3.12	0.55	1.18	0.15	0.58	0.10	535.99
8		51 号	斑状金伯利岩	130.80	229.70	21.21	76.00	10.64	3.27	4.52	0.51	3.55	0.55	1.49	0.18	0.87	0.12	483.41
9	辽宁	51 号	斑状金伯利岩	133.00	239.10	22.59	82.11	11.23	3.49	4.34	0.53	3.48	0.63	1.48	0.15	0.80	0.14	503.07
10		42 号	斑状金伯利岩	117.40	219.00	23.60	88.53	13.14	2.54	5.76	0.71	3.90	0.59	1.59	0.18	0.86	0.10	477.9
11		30 号	斑状金伯利岩	121.10	201.20	16.73	55.94	7.34	1.64	2.28	0.49	2.37	0.37	1.04	0.12	0.60	0.10	411.32
12		辽宁 1 号	斑状富云母金伯利岩	372.60	629.80	52.37	171.20	19.91	4.57	3.93	0.71	4.25	0.59	1.98	0.15	0.72	0.18	1262.96
13		铁岭 1 号	斑状富云母金伯利岩	176.30	381.60	39.76	159.80	24.07	5.31	8.70	0.62	4.18	0.48	1.68	0.12	0.52	0.10	803.24
14	贵州	马坪 1 号	斑状富云母金伯利岩	304.80	587.80	55.72	203.70	27.29	6.69	9.49	1.08	7.24	1.03	3.03	0.31	1.26	0.26	1209.7
15		马坪 1 号	斑状富云母金伯利岩	380.40	711.20	66.51	243.10	32.14	7.22	12.2	1.58	10.2	1.74	4.24	0.33	2.07	0.31	1473.24
16	山西	6 号岩体	斑状金伯利岩	89.66	190.80	20.09	82.07	13.77	3.96	8.01	0.79	5.08	0.77	1.85	0.13	0.98	0.10	418.06
17		4 号岩体	斑状金伯利岩	88.30	189.50	20.52	84.94	14.53	4.02	8.24	0.96	4.97	0.83	1.66	0.15	0.78	0.11	419.51
18	河北	5 号岩体	斑状富云母金伯利岩	227.80	431.80	40.33	146.20	19.41	4.62	6.40	0.72	4.50	0.62	1.83	0.15	0.73	0.14	885.25

分析单位: 地质矿产部岩矿测试研究所。



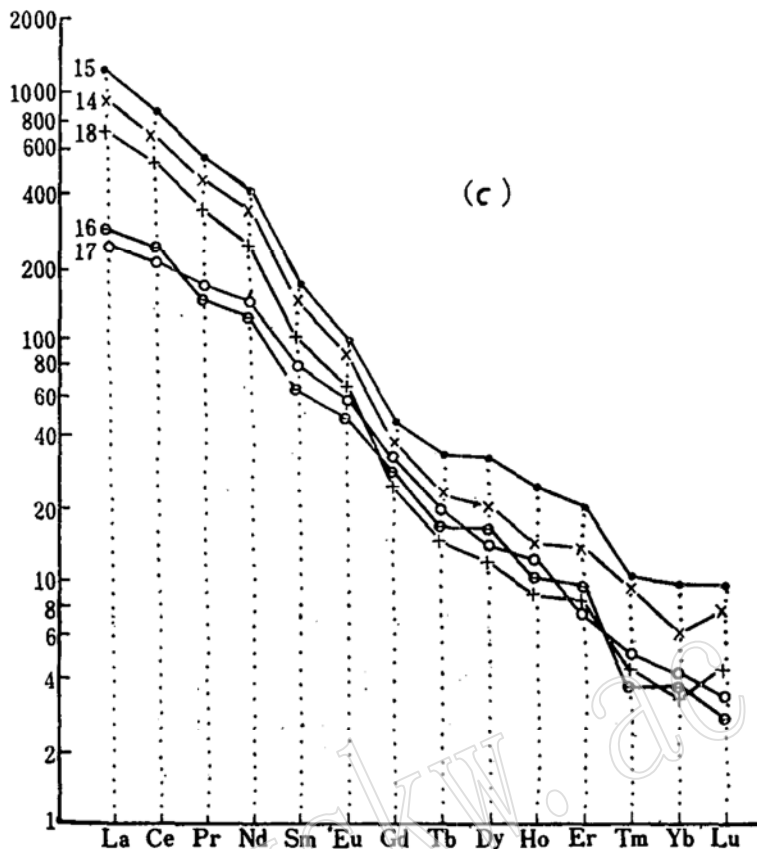


图 1 我国金伯利岩稀土元素配分模式

Fig. 1 Rare earth element distribution patterns for kimberlites in China
 (a) — 山东金伯利岩; (b) — 辽宁金伯利岩; (c) — 贵州 (14、15 号样品)、山西 (16、17 号样品) 和河北 (18 号样品) 金伯利岩
 (球粒陨石值, 据 Boynton^[2], 1984)

显示了强烈的分馏特征。

目前, 多数研究人员认为, 原始地幔岩的 REE 丰度与球粒陨石的 REE 丰度是不一致的。Ringwood (1975) 认为, 原始地幔的 REE 含量应是普通球粒陨石的 1.9—2.6 倍^[3], Jagoutz 等 (1979) 认为是 2—2.5 倍^[4], Frey (1984) 认为是 1.5—3 倍^[5]。原始地幔岩具有平坦的球粒陨石标准化配分曲线。金伯利岩的 REE 含量相对于原始地幔岩是富集型的, LREE 是极富集型的。

金伯利岩的 LREE 极富集型的模式表明, 它们是很低程度的部分熔融的产物。因为地幔矿物相与幔源熔体之间的分配系数, 就 HREE 而言, 除它们在石榴石与其熔体的分配系数 > 1 外, 其余皆 < 1 或 $\ll 1$ 。而 LREE 在所有地幔矿物相中的分配系数均 < 1 (有的 < 0.01)。LREE 比 HREE 具有更强的不相容元素的性质, 所以, 在很低程度的部分熔融的熔体中, LREE 得到很大富集。

必须指出, 金伯利岩的 LREE 极富集型的特征, 固然幔源岩石的部分熔融程度起了很大控制作用, 然而, 就这个单一的因素, 还不足以造成这种特征, 还必须考虑其他因素。其中一个重要的因素是地幔的非均一性。某些原始幔源岩石成分富含 LREE, 当这些幔源岩石部分熔融后, 所形成的金伯利岩浆也必然富含 LREE。另外, 由于金伯利岩浆

早期的高压结晶分离作用, 结晶分离出 HREE 富集型的石榴石等矿物巨晶, 对促使金伯利岩岩浆 LREE 的富集也不应忽视。

我们还应强调, 不同地区金伯利岩, 甚至同一地区不同岩体的 REE 含量和配分模式也有一定的差异。造成这种差异的原因是多方面的:

(1) **部分熔融程度的影响:** 上已述及, 对于部分熔融来说, 稀土元素在熔浆中的含量取决于地幔岩与熔体间分配系数。地幔岩部分熔融程度很低时, LREE 优先进入金伯利岩岩浆中, 使其 La/Yb 比值较高。随着部分熔融程度的增加, HREE 也相继进入金伯利岩岩浆中, 使 La/Yb 降低。由此可知, 由于部分熔融程度的不同, 可形成 REE 配分模式不同的金伯利岩。Mitchell (1986) 指出, 0.3%—0.4% 的部分熔融能够产生 La/Yb 比值为 140 的富云母金伯利岩, 而 0.7%—0.9% 的部分熔融, 能够产生 La/Yb 为 100 的金伯利岩。

(2) **原始幔源岩石中, REE 含量的差异的影响:** 由于地幔的非均一性, 原始幔源岩石中的 REE 含量有一定差异。原始幔源岩石中的 REE 高者, 金伯利岩浆中的 REE 也高, 反之, 亦然。

(3) **金伯利岩浆高压结晶分离矿物含量的影响:** 在金伯利岩浆早期高压条件下, 富 HREE 的石榴石巨晶结晶分离出的越多, 金伯利岩中的 LREE/HREE 比值越大。不过, 因为石榴石不是 REE 的主要赋存相, 而且, 巨晶石榴石在金伯利岩中所占的比例小, 因而, 其结晶分离作用的影响较小。

(4) **壳源包体混染的影响:** 地球不同壳层中的稀土组成有较明显的差异, 壳源物质的混染作用使金伯利岩的 REE 配分模式发生变化, 如受花岗质岩石地壳物质的混染作用影响, LREE/HREE 比值降低, 南非的 Premier 金伯利岩就是一例 (Mitchell, 1986)。另外, 金伯利岩浆中挥发分的含量、岩体的产状等, 对金伯利岩中的稀土含量及配分模式都有影响。

3 金伯利岩中矿物的稀土元素特征

金伯利岩中的钙钛矿是最重要的 REE 矿物载体 (表 2)。我国金伯利岩中钙钛矿的 REE 含量为球粒陨石的 40—20000 倍。其配分模式与 Benfontein 和 Wesselton 金伯利岩的钙钛矿的配分模式相似 (图 2)。

金伯利岩中的磷灰石也是较重要的 REE 载体矿物。我国金伯利岩中磷灰石的 REE 含量为球粒陨石的 15—5000 倍, 但它仅为钙钛矿的 1/4—1/3。其配分模式与 Benfontein 金伯利岩中磷灰石的配分模式相近 (图 3)。

金伯利岩中, 金云母 REE 的含量较低。从所分析的金伯利岩中的巨晶金云母来看, 其 REE 含量为球粒陨石的 0.25—27 倍 (图 4), 为钙钛矿 REE 含量的 1/760—1/200。

山东金伯利岩中镁铝榴石的 Σ REE 为 8.28—16.27 (ppm)。不同颜色的镁铝榴石的稀土配分模式不同, 橙色系列的贫 Cr 的镁铝榴石的稀土配分模式为一简单的较平滑的曲线, HREE 高于 LREE, 这种稀土配分模式与 Monastery 金伯利岩中橙色镁铝榴石的稀土配分模式相似。而紫色系列富铬镁铝榴石的稀土配分模式为一复杂曲线, 其 LREE 与

表 2 我国金伯利岩和云煌岩矿物的稀土元素含量(ppm)
Table 2 Rare earth element contents for minerals of kimberlite and minette in China

顺序号	矿物	岩性	产地和岩体	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
1	铬铁矿	金伯利岩	辽宁50号	0.235	0.400	0.041	0.145	0.025	0.007	0.019	0.003	0.013	0.003	0.008	0.002	0.011	0.002	0.914
2	铬铁矿			0.320	0.540	0.053	0.179	0.045	0.010	0.031	0.005	0.021	0.005	0.011	0.002	0.019	0.003	1.241
3	深紫色镁铝榴石		山东胜利1号	0.221	1.253	0.371	2.855	1.030	0.312	0.908	0.110	0.545	0.102	0.200	0.031	0.286	0.058	8.282
4	橙黄色镁铝榴石			0.145	0.631	0.149	1.290	0.348	0.397	1.694	0.355	2.787	0.760	1.852	0.310	2.404	0.408	14.03
5	深紫色镁铝榴石			0.246	1.262	0.370	2.925	1.165	0.369	1.048	0.128	0.648	0.127	0.257	0.041	0.356	0.075	9.02
6	橙红色镁铝榴石			0.167	0.822	0.261	2.422	1.580	0.679	2.648	0.474	3.050	0.677	1.441	0.214	1.578	0.256	16.27
7	磷灰石		山东红旗27号	929.4	800.6	64.57	198.3	38.54	14.32	33.06	4.79	19.93	3.07	6.48	0.63	2.89	0.43	2117.01
8	磷灰石		湖北彭家湾	1605.0	2832.0	307	1248	253.1	47.88	197.1	25.68	129.5	21.07	49.30	5.0	21.10	2.80	6744.5
9	钙钛矿		山东胜利1号	6532.0	12590	1207	3952	495.6	114.7	191.7	6	73.63	9.64	32.47	3.50	7.30	2	25217.5
10	巨晶金云母		山东胜利1号	8.48	15.80	1.77	6.77	0.85	0.21	0.47	0.041	0.162	0.025	0.044	0.006	0.035	0.007	34.67
11	金云母		云煌岩	山西鹤毛口	13.24	26.10	3.23	13.43	2.54	0.76	2.03	0.24	1.20	0.22	0.44	0.058	0.393	0.063

分析单位: 地质矿产部岩矿测试研究所。

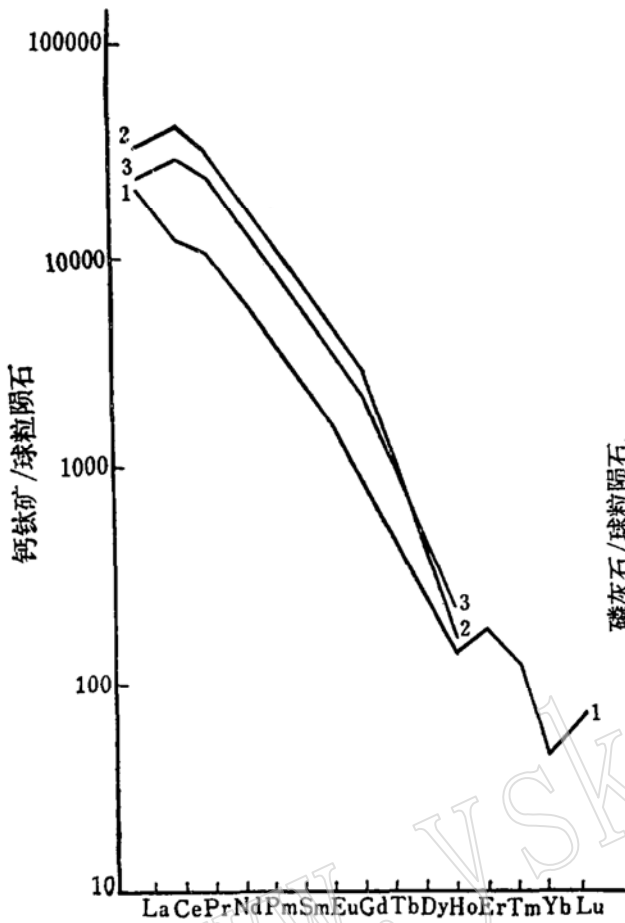


图 2 金伯利岩钙钛矿的稀土配分模式
 Fig. Rare earth element distribution patterns for perovskite in kimberlites
 1—山东胜利 1 号; 2—Benfontein(Jones和Wyllie, 1984); 3—Wesselton(Jones和Wyllie, 1984)
 (球粒陨石值, 据Boynnton⁽²⁾, 1984)

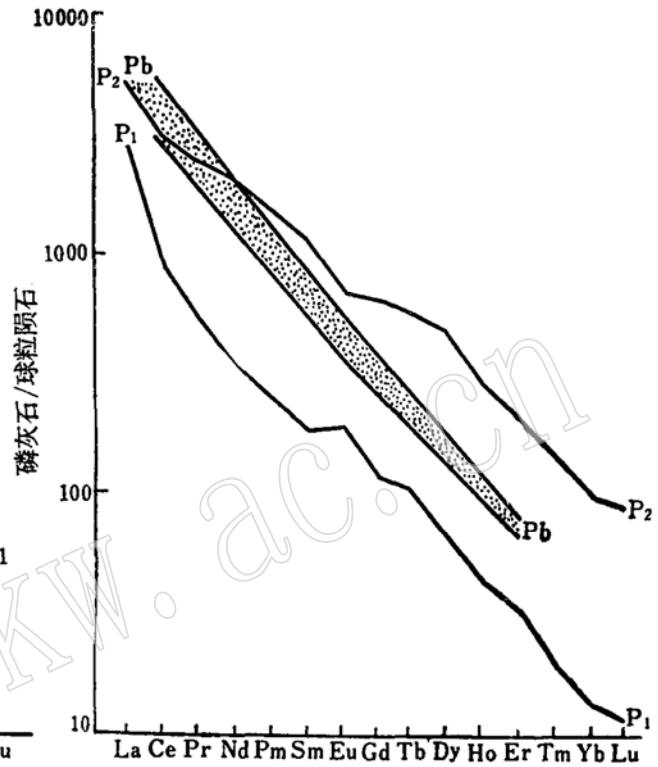


图 3 金伯岩中磷灰石的稀土配分模式
 Fig. 3 Rare earth element distribution patterns for apatites in kimberlites
 P₁—山东红旗 27 号; P₂—湖北京山; Pb—Benfontein (Jones 等, 1984)
 (球粒陨石值, 据 Boynton, 1984)

橙色系列者很相近, 而 HREE 比橙色系列者低得多 (图 5)。

金伯利岩中铬尖晶石的 REE 含量低。我国金伯利岩中铬尖晶石的 LREE 为球粒陨石的 0.2—1 倍 (图 6), 为钙钛矿的 1/100000—1/20000。铬尖晶石的 HREE 为球粒陨石的 0.04—1 倍, 为钙钛矿的 1/500000—1/20000。

由上可以看出: 1. 金伯利岩中钙钛矿和磷灰石的稀土含量高, 金云母中的 REE 含量低, 而镁铝榴石及铬尖晶石中的 REE 含量更低。2. 稀土元素在矿物中密切共生, 即铈族稀土元素和钇族稀土元素存在于同一矿物中。这是由于它们的“镧系收缩”性质造成的, 即随着原子系数的增加, 其离子半径并不增加, 而是大致保持不变, 甚至减少, 因而造成它们的离子半径、电离势及电负性均相近的情况, 同时, 它们往往呈三价态存在。这种相似的地球化学性质, 决定了它们有相似的地球化学行为。3. 钙钛矿和磷灰石矿物都

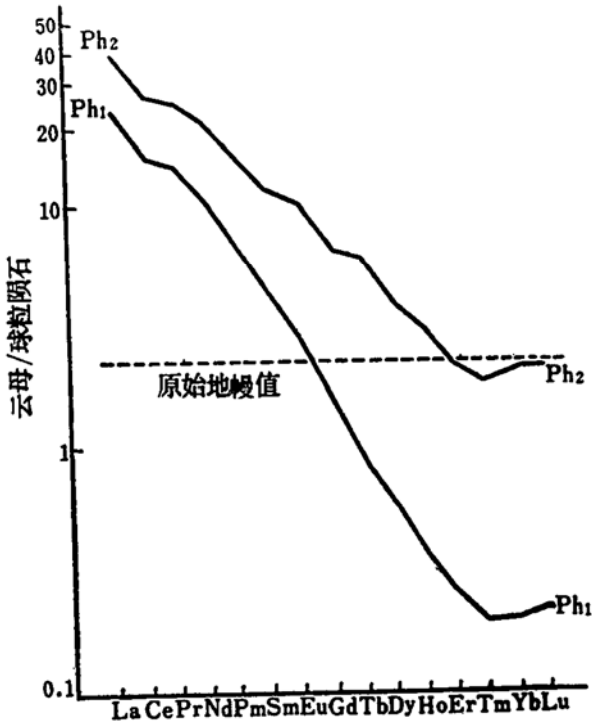


图 4 金伯利岩和云煌岩中金云母的稀土配分模式

Fig. 4 Rare earth element distribution patterns for phlogopites in kimberlite and minette

Ph₁—山东胜利1号金伯利岩中金云母巨晶; Ph₂—山西鹅毛口云煌岩中的金云母 (球粒陨石值, 据 Boynton, 1984)

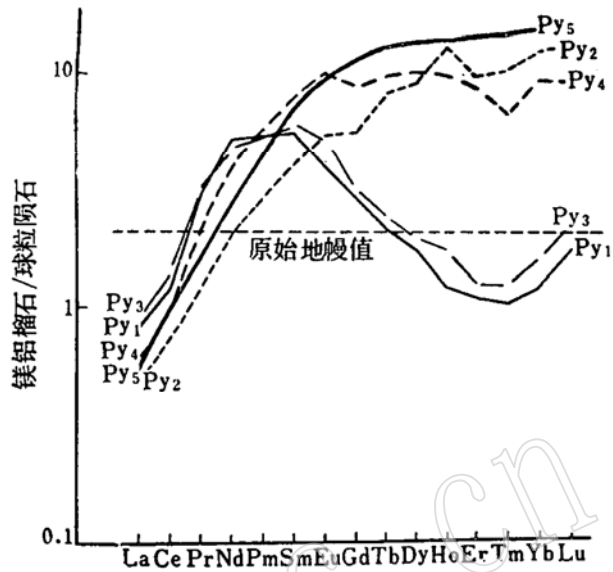


图 5 金伯利岩中镁铝榴石稀土配分模式

Fig. 5 Rare earth element distribution patterns for pyropes in kimberlites

Py₁—山东胜利1号、深紫色; Py₂—山东胜利1号, 橙黄色; Py₃—山东红旗1号, 深紫色; Py₄—山东红旗1号, 橙红色; Py₅—Monastery 贫铬, 橙色镁铝榴石 (Jones, 1987) (球粒陨石值, 据 Boynton, 1984)

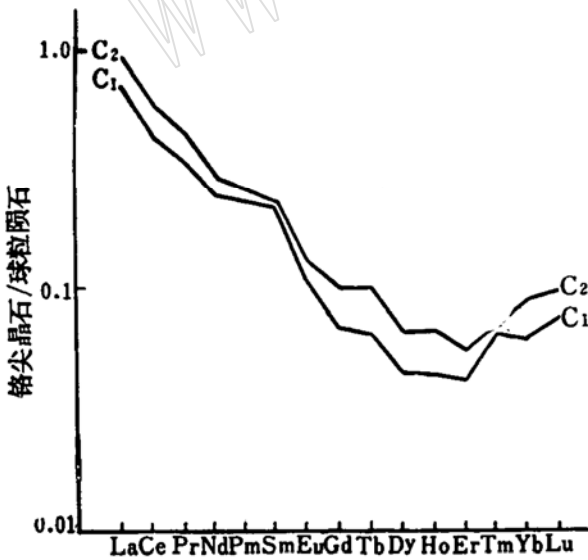


图 6 金伯利岩铬尖晶石稀土配分模式

Fig. 6 Rare earth element distribution patterns for Cr-spinel in kimberlites

C₁—辽宁50号; C₂—山东胜利1号 (球粒陨石值, 据 Boynton, 1984)

是富含 LREE 的强选择配分型的矿物, 而且 REE 配分模式曲线较平滑, 向右倾, 这种配分模式与金伯利岩中 REE 配的分模式相同。

4. 金伯利岩矿物中的 REE 含量变化情况, 主要受下列因素影响: 1) 矿物种类及其化学成分和结晶构造的差异: 不同种类的矿物, 其 REE 配分模式不同。不同种属的同一类矿物, 由于其化学成分上的差异, 其 REE 配分模式也不同, 如紫色富(Cr)的镁铝榴石和橙色(贫Cr)的镁铝榴石的 REE 配分模式明显不同, 就是这方面的例证; 2) 矿物结晶早晚: 上已述及, REE 为不相容元素, 而且 LREE 比 HREE 表现了更强的不相容性质, 所以, REE 元素, 尤其是 LREE, 趋于分散于金伯利岩浆晚期结晶的矿物

中。钙钛矿是金伯利岩浆晚期结晶阶段的产物，因而，它含 REE 最富，而且 LREE >> HREE。橙色的（贫 Cr）镁铝榴石巨晶为金伯利岩浆早期在上地幔高压条件下结晶的产物。它的 REE 含量低，而且 HREE > LREE。

5. 在金伯利岩中，未见独立的稀土矿物产出，它们主要呈类质同象的形式进入其他矿物中。具有大离子半径元素的矿物中，主要存在着与其大离子进行类质同象替代的 LREE。在含小离子半径元素的矿物中，主要存在着与其小离子半径元素进行类质同象替代的 HREE。例如，在含有大离子半径 Ca^{2+} (1.06 Å) 的矿物（钙钛矿、磷灰石等）中，主要含有与 Ca^{2+} 发生类质同象替代的 Ce (1.03 Å) 等 LREE，而在含有小离子半径的元素 (Fe、Mg) 的橙色贫 Cr 的镁铝榴石中，主要含有与其小离子半径的元素发生类质同象替代的 HREE。

金伯利岩中 La 和 P 呈不太明显的正相关关系（图 7），它间接表明 La 等轻稀土元

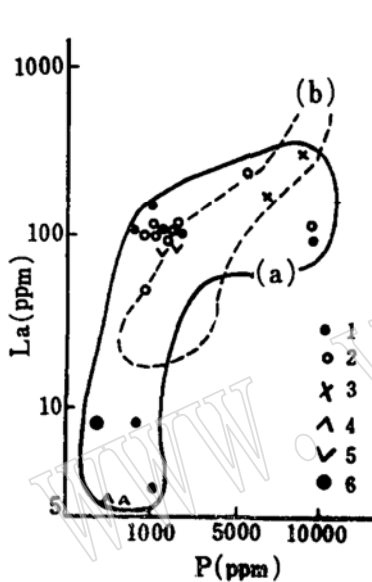


图 7 金伯利岩中 La—P 含量图

Fig. 7 La versus P contents of kimberlites

(a) 我国金伯利岩：1—山东；2—辽宁；3—贵州；4—河北；5—山西；6—河南。(b) 南非金伯利岩 (Mitchell, 1986)

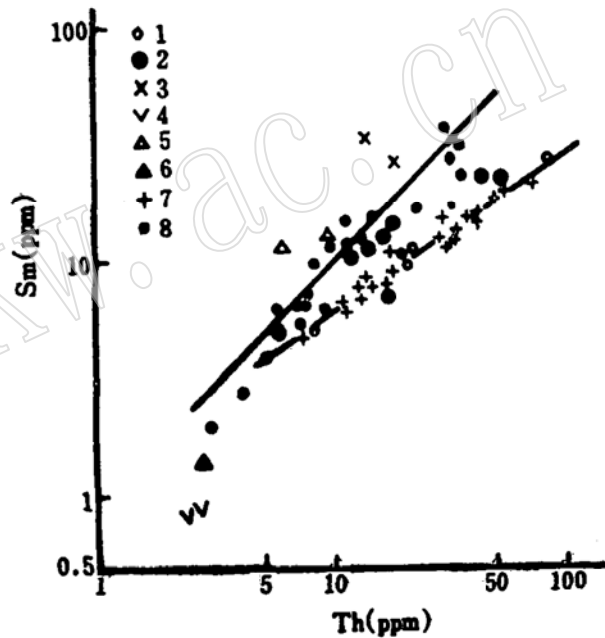


图 8 金伯利岩 Sm—Th 图

Fig. 8 Sm versus Th contents of kimberlites

1—山东；2—辽宁；3—贵州；4—湖北；5—山西；6—河南；7—Bellsbank (Fcsq 等, 1975)；8—Kimberley (Mitchell, 1986)

素与磷灰石有关。

另外，REE 与 Th 表现了密切的类质同象关系，这可由 Sm 与 Th 呈较明显的正相关关系，得到说明（图 8）。

综上所述，得出如下结论：

1. 金伯利岩中 Σ REE 很高，但变化较大。为 LREE 极富集型。

2. 不同地区及同一地区不同岩体的金伯利岩的 REE 含量和配分模式有一定差异。

造成这种差异的主要原因是：部分熔融程度，地幔的非均一性，金伯利岩浆早期结晶的石

榴石巨晶矿物的含量,壳源物质的混染作用,岩浆中挥发份含量及岩体产状。

3. 钙钛矿是金伯利岩中主要的稀土载体矿物,次为磷灰石。

感谢王恒升及白文吉研究员和池际尚教授的指导。

参 考 文 献

- 1 Mitchell R H. Kimberlites (Mineralogy, Geochemistry, and Petrology). New York: Plenum press, 1986. 299—305.
- 2 Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. Dev. Geochem., 1984, (2): 63—114.
- 3 Ringwood A E. Composition and petrology of the earth's mantle. New York; McGraw-Hill, 1975. 618.
- 4 Jagoutz E, Palme H, Baddenhausen H, Blum K, Cendales M, Dreibus G, Spettel B, Lorenz V, Wanke H. The abundance of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf., 1979, 10 th: 2031—2050.
- 5 Frey F A. Rare earth abundances in upper mantle rocks In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishers, B V, Amsterdam, 1984. 153—203.

The Characteristics of Rare Earth Elements from Kimberlites in China

Dong Zhenxin

(Geological Museum of China)

Key words: kimberlite; rare earth elements

Abstract

The total REE contents of kimberlites in China exhibit wide variations, ranging from 218.9 ppm to 1473.24 ppm. The kimberlites are characterized by simple linear REE distribution pattern showing extreme enrichment in LREE. The abundances of La and Yb are 180—1190 and 3—15 times those of chondritic respectively. La/Yb ratios range from 73.16 to 517.5.

Principal mineral carrier of REE in kimberlites is perovskite (40—20000 times chondritic abundance). Apatite (15—5000 times chondritic abundance) is of subordinate importance. Phlogopite (0.25—27 times chondritic abundance), pyrope (0.45—7.9 times chondritic abundance), Cr-spinel (0.2—1 times chondritic abundance) are low in REE. The REE contents of whole rocks of kimberlites and distribution patterns are mainly controlled by perovskite,