

月面克里普岩成分特征及 REE 等资源开发利用前景^{*}

邹永廖¹ 欧阳自远^{1,2}

¹(中国科学院国家天文台 北京 100012)

²(中国科学院地球化学研究所)

摘 要

克里普岩 (KREEP) 最早发现于 Apollo-12 样品, 后来在所有返月样品中都发现 3 克里普岩碎片, 尤其以 Apollo-12 和 Apollo-14 着陆点样品中最多, 因其富含元素 K, REE 和 P 而被称之为 KREEP. 克里普岩在月面上的分布极为重要, 不但因其对月亮形成期间及形成以后的月球的演化具有重要的意义, 而且由于克里普岩中富含 REE 等重要资源性元素, 被认为可能是除钛铁矿外最重要的月球矿产资源储存库. 本文在综合已有探测资料和研究成果的基础上, 通过克里普岩的化学成分与矿物组成特征, Th 在风暴洋区丰度的异常特征, 以及克里普岩中 Th 与 REE 相关关系的分析, 探讨了 KREEP 岩石在月面上的分布区域, 进而对月球 REE 资源的开发利用前景进行了初步评估.

关键词 月球; 克里普岩; Th; 稀土元素

1 引言

在所有月球成因理论中, 目前比较合理且得到大多数学者承认的假说是“大碰撞分裂说”. 该假说认为, 地球早期受到一个火星尺寸的小天体的撞击, 碎片在轨道中由两个天体的硅酸盐幔的一部分组成月球; 碰撞所形成的热能导致了“岩浆洋”的产生, “岩浆洋”是厚约几百公里的层状熔融外层^[1]; 随着月球的冷却, 矿物根据其熔体密度的相对大小, 有的上浮, 有的下沉, 有的就赋存于原来结晶的地方. 基性矿物如辉石、橄榄石等构成了月幔, 而较轻的富铝硅酸盐矿物如斜长石上浮形成月亮. 随着冷却和分异的继续进行, 由于不相容元素不易进入主要硅酸盐矿物晶格而越来越富集于残余熔浆之中, 最终形成以富含 K, REE 和 P 为特征的克里普岩并赋存于月亮与月幔之间的过渡层^{[2],[3]}. 尽管在 Apollo 返月样品中发现有大量的克里普岩存在, 但对其在月面的出露原因及具体的分布区域等问题一直没有得到解决, 直到 1994 年发射 Clementine 和 1998 年发射 Lunar Prospector 后, 通过对 Th 丰度在月面上分布规律的分析, 对克里普岩出露月面或近月表的位置才有了新的发现和认识^{[4],[5]}.

克里普岩在月面岩石和月壤中的分布极为重要, 不但因其对月亮形成期间及形成以后的月球的演化具有重要的意义, 而且由于克里普岩中富含 REE, Th, U 等重要资源性元

^{*} 国家自然科学基金项目 (40243019), 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-115) 共同资助
2003-04-03 收到原稿, 2003-08-11 收到修定稿

表 1 典型的 KREEP 或类 KREEP 的化学成分 (氧化物为 wt%, 元素为 $\mu\text{g/g}$)Table 1 The chemical compositions of KREEP rocks (oxide: wt%, element: $\mu\text{g/g}$)

样品号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	Li	P	S	Sc
15382	0.87	7.83	16.9	52.5	0.53	9.43	1.90	9.02	—	2400	—	19
15386	0.77	9.34	15	50.8	0.61	9.60	2.06	10.4	27.2	3054	900	22
15405	0.89	3.60	12.6	56.4	2.06	8.10	1.85	13.5	40.9	1700	—	30
14303	1.25	3.30	18.5	58	3.60	8.80	0.75	5.57	—	—	—	10.7
72275	0.42	8.42	14.3	49.2	0.33	10.4	1.10	14.0	—	—	—	50
高钾角砾岩	0.86	10.6	16.6	47.9	0.83	9.51	1.67	10.6	56	3400	1100	23
61156	0.40	5.59	23	45	0.11	13.4	0.63	7.83	10.5	960	1200	9.4
样品号	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
15382	60	170	940	17	23	—	2.6	—	47	—	72	142
15386	62	2280	1200	23	12.5	—	3.5	6.2	61	—	—	—
15405	33	1370	1400	7.9	< 2	—	5.6	—	250	—	96.5	170
14303	23	550	480	14.1	< 60	—	—	9.2	—	—	—	—
72275	120	1940	1630	35	60	—	4	3.14	—	—	—	—
高钾角砾岩	43	1300	1080	33	20	20	3.6	7.5	40	—	—	—
61156	—	917	780	59	690	6.60	5.0	4.5	1750	370	—	—
样品号	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ru	Pd	Ag	Cd	In	Sb	Te
15382	15.4	189	—	1068	—	—	< 0.6	0.44	87	2.66	0.17	1.0
15386	16.2	187	—	970	—	—	—	—	10	1.8	—	—
15405	34	172	—	1620	—	—	< 0.9	2.33	14	23	0.88	5.7
14303	113	230	—	1020	—	—	—	—	—	—	—	—
72275	13	85.6	—	623	—	—	—	—	—	—	—	—
高钾角砾岩	22	220	300	1700	80	500	—	—	15	1.2	—	—
61156	2.43	153	62.3	299	16.3	—	59	—	—	—	—	—
样品号	Cs	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Ho	Yb	Lu
15382	725	702	73.8	215	115	31.4	2.75	42.9	6.2	—	21.6	3.07
15386	800	744	70.8	179	114	33	2.56	45.4	5.3	—	21.3	2.84
15405	1055	1695	217	558	328	87.5	2.65	110	17.3	—	60.4	8.42
14303	2200	2080	57	147	93	22.8	3.30	—	4.7	6.7	18	2.6
72275	450	398	49	130	81.8	22.8	1.61	—	4.7	5.8	13	1.8
高钾角砾岩	1200	1200	110	270	180	49	3.0	57	10.0	14	36	5.0
61156	150	207	21.5	53.4	33.1	9.6	1.32	11.9	2.10	3.3	6.65	0.90
样品号	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Au	Tl	Pb	Bi	Th	U
15382	29.9	3.1	—	0.009	0.018	0.013	0.003	3.2	5.94	290	10.3	3.37
15386	23.6	2.4	—	—	—	0.061	0.22	—	—	—	10.0	2.80
15405	47.9	11.6	—	0.053	0.007	0.175	0.15	4.8	14	260	56.1	11.0
14303	21	3.1	—	—	—	< 2.8	—	—	—	—	17.9	5.6
72275	17.0	1.51	—	—	—	< 2	—	—	—	—	5.6	1.35
高钾角砾岩	37	4.0	2.0	—	—	0.1	0.1	—	—	—	18	5.0
61156	7.3	0.83	0.56	2.6	—	23	22	—	2.1	—	3.24	0.86

素,被认为可能是除钛铁矿外最重要的月球矿产资源储存库.为此,本文在系统分析已有探测资料和研究结果的基础上,通过 Th 全球丰度的分布特征及克里普岩中 Th 与 REE 相关关系的分析,探讨克里普岩出露月面的成因机制及 Th, U, REE 等资源的开发利用前景.

2 克里普岩化学成分及其矿物组成特征

克里普岩最早在 Apollo-12 样品 (12013 号样品) 中发现,后来在其他返月样品中都被发现有克里普岩碎片,尤其以 Apollo-12 和 Apollo-14 的着陆点最多^[6],因其富含元素 K, REE 和 P 而被称之为 KREEP,是高地三大岩石类型之一.

根据钾的含量,克里普岩又可分为 ($K_2O > 0.7 \text{ wt}\%$) 高钾克里普岩、中钾克里普岩 ($K_2O: 0.35 \text{ wt}\% \sim 0.7 \text{ wt}\%$) 和低钾克里普岩 ($K_2O < 0.35 \text{ wt}\%$),表 1 和表 2 分别列出一些典型的克里普岩的化学成分及矿物成分的分析结果^[6],图 1 是根据表 1 得出的克里普岩中一些不相容元素的配分模式.

表 2 克里普岩的矿物组成 (体积 %)

Table 2 Mineral components of KREEP rocks (volume%)

矿物名称	140303	A-15	15382	15386	15405c	72275
斜长石	33	41	43	43	35	40
辉石 (斜方辉石、易变辉石和高钙辉石)	11	35	41	43	36	40
橄榄石	微量	—	—	—	—	—
不透明矿物	1	3	6	3	2	微量
SiO ₂ 矿物	23	4	—	8	11	—
锆石	微量	—	—	—	0.6	微量
钾长石	32	—	—	微量	15	微量
磷灰石	微量	—	微量	—	—	—
白磷钙矿	—	—	微量	微量	0.8	微量
玻璃基质	—	17	8	—	—	20

从表 1, 表 2 和图 1 中可以看出:

(1) 从化学成分上看, 克里普岩本质上属于玄武岩, 但与月海玄武岩不同的是所有的克里普岩都极为富含 K, P, REE 和 Th, U 等难容元素.

(2) Th 与 REE 具明显的正相关关系.

(3) 克里普岩主要的矿物组成有长石 (斜长石、钾长石)、辉石、SiO₂ 矿物和不透明矿物, 无或极微量的橄榄石矿物, 其中辉石显示出其成分变化很宽的范围, 包括最早形成的含低钙斜方辉石, 较晚形成的低钙低镁的易变辉石, 最后的钙含量很高的高钙辉石.

(4) 克里普岩所富集的微量元素都是不相容元素.

(5) 所有克里普岩中稀土元素的配分模式极为相近, 结合其同位素 Sm/Nd 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁷Nd

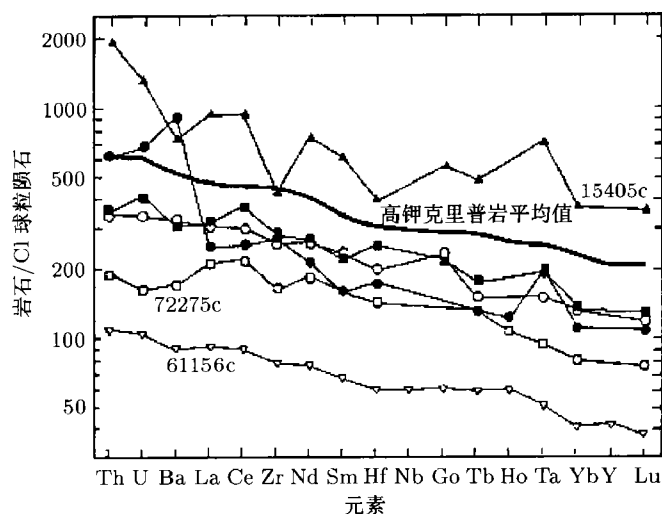


图 1 克里普岩中一些不相容元素的配分模式

Fig.1 Contents of various incompatible elements of KREEP rocks normalized to element abundances in C1 carbonaceous chondrites

的比值比较接近的特征^[7], 表明所有的克里普岩属同源的, 是岩浆分异或残余熔浆结晶形成的富含挥发组分元素的物质。

3 元素 Th 在月面分布异常区

元素 Th 不但是研究月球和月球表面演化最关键的元素之一^{[8],[9]}, 而且因其富集于克里普岩之中, 对其全球性分布的研究还可进一步了解克里普岩的形成与演化过程。根据最近 Clementine 和 Lunar Prospector 的探测结果^{[4],[8],[10]}, 发现在月球正面风暴洋区域 Th

表 3 月面 FeO 和 Th 含量的平均变化值

Table 3 Mean contents of FeO and Th on the lunar surface

物质类型		FeO/(wt%)	Th/($\mu\text{g/g}$)	占探测区域 (月球正面: 60°S—60°N) 面积百分含量
高地斜长岩	内	4.2 (± 0.5)	0.8 (± 0.3)	24.8
	外	5.5 (± 1.6)	1.5 (± 0.8)	34.7
月海玄武岩区	内	16.2 (± 2.2)	2.2 (± 0.7)	2.8
	外	8.8 (± 2.3)	1.6 (± 0.8)	10.2
风 暴 洋 区	克里普岩区	9.0 (± 1.6)	5.2 (± 1.4)	2.0
	克里普岩与 月海玄武岩混合区	17.3 (± 1.8)	4.9 (± 1.0)	7.6
	高地斜长岩、克里普岩 与月海玄武岩混合区	10.7 (± 2.6)	4.5 (± 2.0)	6.9
南极 Aitken 盆地	内	10.1 (± 2.1)	1.9 (± 0.4)	5.3
	外	5.7 (± 1.1)	1.0 (± 0.3)	5.7

的含量很高. 表 3 列出了根据 Lunar Prospector 从月面 60°S 到 60°N 区域的 FeO 和 Th 探测资料的分析结果^[10].

从表 3 中可以看出,

(1) 风暴洋区 Th 的含量都相当高. 而导致这些高 Th 的原因, 即到底这些高 Th 含量的载体是什么岩石类型, 以及这些高 Th 含量是否在该区深部也很高, 其延伸深度如何等问题, 长期以来一直没有得到解决. 一些学者认为, 这些高 Th 的载体可能是外来物质引起的^[9], 也有学者认为可能是深部克里普岩侵入月表后, 因玄武岩喷发, 带出下覆克里普岩, 或直接喷发造成的^{[3],[4]}. 我们认为, 要解决这个问题, 首先要分析高 Th 的载体究竟是不是克里普岩. 图 2 是 Apollo-12 月壤样品的中子活化分析结果^[11]. 从图中可以清楚地看到, 月壤样品并不具有像一些 Apollo-14 和 Apollo-15 样品一样具有高 Th 丰度和富含 FeO 的玄武岩. 富 Ti 组分上看, 它也明显不是一些如花岗岩、富 Si₂O 二长闪长岩、二长辉长岩等的独特岩石, 而是一些富含 Ti 的绳状玻璃碎片^[12], 这些玻璃碎片显然是由撞击而形成的覆盖在月表上的产物. 因此, 这些高 Th 源物质只能是由于巨大撞击作用、挖掘出被月海玄武岩覆盖的下覆岩石, 同样, 在 Apollo-14 样品中也有完全一样的高 Th 绳状玻璃碎片, 其成因同样来自撞击. 而从上面的分析可知, Th 与 REE 具有很好的相关关系, 特别是 Sm, Ga 也与 Th 有很好的相关性^{[6],[7]}, 因此, 这一区域极有可能就是克里普岩的出露区.

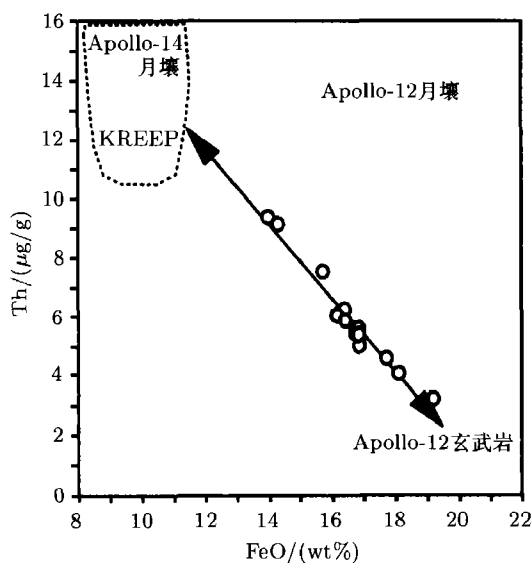


图 2 Apollo-12 月壤样品中 FeO 与 Th 的相关关系

Fig.2 The relation between the FeO and Th contents in Apollo-12 soil

(2) 克里普岩的 FeO 一般在 10 wt% 左右, Th 含量都大于 3 (见表 1), 而月海玄武岩的含量一般在 16 wt% 以上, 据此, Jolliff 等人^[10] 把该区划分成克里普岩区, 克里普岩与月海玄武岩混合区, 以及高地斜长岩、克里普岩与月海玄武岩的混合区, 但从返月样品中克里普岩分析结果看, 绝大多数的 Th 含量明显比表 3 的分析结果高得多, 因此, 该区

所探测到的高 Th 物质很有可能都是混合型的. 这就表明在这些高 Th 区域, 绝大多数克里普岩并没有完全出露, 而是被上面一层薄薄的月海玄武岩所覆盖.

(3) 根据生热元素的简单计算模式^[13]和高 Th 覆盖面积^[9], 可以估算出风暴洋区下覆克里普岩的体积约为 $2.2 \times 10^8 \text{ km}^3$. 考虑到由 Lunar Prospector 探测的 Th 含量仅仅是混合型的结果, 那么实际的克里普岩中 Th 的含量肯定要高些. 此外, 假设风暴洋区下覆的克里普岩中 REE, Th, U 含量均一, 如果以表 1 的 REE, Th 和 U 的分析结果为计算标准, 那么, 风暴洋区下覆克里普岩中 REE 的资源量约为 $(2.25-4.5) \times 10^{14} \text{ kg}$. 尽管这一计算结果受到目前有限探测资料的影响, 特别是风暴区下覆克里普岩是直接受巨大撞击引起其源区侵入月壳, 或是在早期的演化过程就侵入月壳等问题到目前还没有得到解决, 都直接影响到克里普岩体积计算结果的准确性与可靠性. 但是, 无可置疑的是克里普岩中所蕴涵的丰富的稀土元素等是未来人类开发利用月球的重要矿产资源之一, 为未来月球资源开发与利用提供了广阔的探测与研究前景.

4 小结

综上所述, 可以得出以下结论.

(1) 克里普岩的化学成分与矿物成分特征表明它是月球早期岩浆洋分异的残余相, 其源区应该在月壳与月幔的过渡层.

(2) 由于克里普岩中 Th 含量的实际分析结果明显比 Lunar Prospector 所探测到的风暴洋区 Th 含量高, 以及根据该区 Apollo-12 样品中富含 Th 玻璃碎片的分析、克里普岩中 Th 与 REE 之间的正相关关系等, 该区大面积高 Th 物质可能来自于撞击溅射物, 即由于巨大撞击作用, 挖掘出下覆部分克里普岩, 其撞击溅射物混合了该区克里普岩、月海玄武岩和高地斜长岩.

(3) 风暴洋区克里普岩中富含丰富的 REE 等元素是月球重要的矿产资源之一, 不但为今后月球资源开发与利用提供了广阔的探测与研究前景, 也为未来月球基地选址等提供重要的理论依据.

参 考 文 献

- [1] Warren P H. The magma ocean concept and lunar evolution. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1985, 13:201—217
- [2] Warren P H, Wasson J T. The origin of KREEP. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1979, 17:73—88
- [3] Hubbard N J, Gast P W, Meyer C *et al.* Chemical composition of lunar anorthosites and their parent liquids. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1971, 13:71—75
- [4] Mark A Wieczorek, Roger J Phillips. The “Procellarum KREEP Terrane”: Implications for mare volcanism and lunar evolution. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(E8):20 417—20 430
- [5] Haskin L A *et al.* The materials of the Lunar Procellaru—KREEP Terrane: A synthesis of data from geomorphological mapping, remote sensing, and sample analyses. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(E8):20 403—20 415
- [6] Heiken G, Vaniman D, French B M. Lunar Sourcebook — A User’s Guide to the Moon. New York: Cambridge University Press, 1991. 357—474

- [7] Ouyang Ziyuan. Cosmochemistry. Beijing: Science Press, 1989. 93—145. in Chinese (欧阳自远. 天体化学. 北京: 科学出版社, 1989. 93—145)
- [8] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L *et al.* Global elemental maps of the Moon: The Lunar Prospector Gamma-Ray spectrometer. *Science*, 1998 **281**:1984—1988
- [9] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L *et al.* Thorium abundances on the lunar surface. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(E8):20307—20337
- [10] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A *et al.* Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(E2):4197—4216
- [11] Korotev D L, Rockow K M. Compositional trends in Apollo 12 soils. *Lunar Planet. Sci.*, 1972, **28**:787—788
- [12] Wentworth S J, McKey D S, Lindstrom D J *et al.* Apollo 12 ropy glasses revised. *Meteoritics*, 1994, **29**:323—333
- [13] Wieczorek M A, Phillips R J. Thermal modelling of mare volcanism and the “Procellarum KREEP Terrane”. *Lunar Planet. Sci.*, 1999, **30**:1547

COMPOSITION CHARACTERISTICS OF KREEP ROCKS AND UTILIZATION PROSPECT OF REE

ZOU Yongliao¹ OUYANG Ziyuan^{1,2}

¹(National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

²(Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

KREEP rocks with high contents of K, REE and P were first recognized in Apollo 12 samples, and confirmed later that there were KREEP rock fragments in all of Apollo samples particularly in Apollo-12 and 14 samples. The distribution of KREEP rocks on the lunar surface is very important not only for studying the evolution of the moon, but also for evaluating the utilization prospect of REE in KREEP rocks. Based on previous studies and lunar exploration data, the authors analyse the chemical and mineral characteristics of KREEP rocks, the abundance of Th on lunar surface, the correlation between Th and REE of KREEP rocks in abundance, study the distribution region of KREEP rocks on the lunar surface, and further evaluate the utilization prospect of REE in KREEP rocks.

Key words The Moon, KREEP rocks, Thorium, REE