

# 月球表面岩石类型的分布特征:基于 Lunar Prospector (LP) 伽马射线谱仪探测数据的反演\*

李泳泉<sup>1,3</sup> 刘建忠<sup>2\*\*</sup> 欧阳自远<sup>1,2</sup> 李春来<sup>2</sup> 邹永廖<sup>2</sup>

LI YongQuan<sup>1,3</sup>, LIU JianZhong<sup>2\*\*</sup>, OUYANG ZiYuan<sup>1,2</sup>, LI ChunLai<sup>2</sup> and ZOU YongLiao<sup>2</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

3. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2006-11-08 收稿, 2007-04-12 改回.

LI YQ, Liu JZ, Ouyang ZY, Li CL and Zou YL. 2007. Petrologic distributions on the moon: based on the Lunar Prospector (LP) gamma-ray spectrometer data transformation. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1169–1174

**Abstract** The Apollo and LP gamma-ray Spectrometers have gained 10 types of element distributions on lunar surface, through syncretize gamma-ray Spectrometer data to lunar rocks and meteorolites chemical composition data. We obtain ternary-diagram approach to build relationships between elements and petrologic types. At the same time, use the syncretized data to plot global petrologic distributions of mare basalt, plagioclase, KREEP rock and Mg-rich rock on the moon.

**Key words** Lunar Rocks, Distributions, Gamma-ray Spectrometer, Data Transformation

**摘要** Apollo 和 LP 伽马射线谱仪获取了全月 10 种元素的分布图,通过已有的月岩以及陨石的化学成分数据,将伽马射线谱仪探测数据与这些数据融合,用 Th-Fe-Mg 三角图解定性的获得元素含量与岩石类型的相关性,同时通过以前融合的数据,获得了月海玄武岩、月陆斜长岩、KREEP 岩和富镁岩的全月球表面岩石类型分布图。

**关键词** 月岩; 分布; 伽马射线谱仪; 数据反演

**中图法分类号** P184.54

Apollo 和 LP 携带的伽马射线谱仪通过绕月探测,获得了月球上 O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Ti、U、Th 局部和全球的元素分布图 (Metzger *et al.*, 1973; Davis, 1980; Lawrence *et al.*, 1998, 1999, 2000, 2002; Prettyman *et al.*, 2002), 这些对于研究月球的形成以及月球化学演化机制有重要的意义。以往的研究表明,月球表面主要有三类岩石:玄武岩、斜长岩(钙长岩)和 KREEP 岩(富含 K、REE 和 P) (Taylor *et al.*, 1991)。近年来通过月球样品和月球陨石的研究发

现,在月陆区常还含有镁含量高的月岩,通常与橄长岩、苏长岩以及纯橄榄岩相似的化学成分,而这些通常被认为来自于月幔的岩石 (Shearer and Papike, 2005),因此,获取富镁岩石 (Mg-rich rock) 的分布特征,对月岩的形成和演化研究具有非常重要的作用。

本文基于 LP 伽马射线谱仪探测的元素数据,采用 Th-Fe-Mg 三角图解建立元素含量与岩石类型之间的定性关系 (Davis and Spudis, 1987; Shkuratov *et al.*, 2005; Berezhnoy

\* 国家自然科学基金(40573047, 40232026, 40243019)。

第一作者简介:李泳泉,男,1982年生,博士研究生,主要从事地球化学及天体化学研究, E-mail: liyongquan@bao.ac.cn

\*\* 通讯作者:刘建忠, E-mail: liujz@bao.ac.cn

et al., 2006), 将已有的月球四类岩石的数据加入到三角图的分析中, 通过图解以及相关的经验数据, 定量建立元素含量和岩石类型的关系。并初步确定了月海玄武岩、月陆斜长岩(钙长岩)、KREEP 岩(富含 K、REE 和 P)和富镁岩的全月球表面分布特征, 为我国绕月探测工程科学目标的实现提供基础数据和基本方法。

## 1 Th-Fe-Mg 三角解图

月球样品的研究证实, KREEP 岩富含 U、Th、K 等大离子元素, Th 含量高的月岩为镁铁质撞击熔融角砾岩以及 KREEP 岩(Krotov et al., 1998; Li et al., 2006), 而镁铁质撞击熔融角砾岩一般都混有 KREEP 岩, 且不能代表原始成分的岩石, 因此在月球岩石分类时, 不单独划分出来。图 1 为 LP 伽马射线谱仪以  $5^\circ \times 5^\circ$  为单位全月数据 Th-Fe 三角解图(原始数据见 [http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lunar/reduced\\_special.html](http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lunar/reduced_special.html), 本文凡涉及 LP 伽马射线谱仪探测数据均见以上网站)。

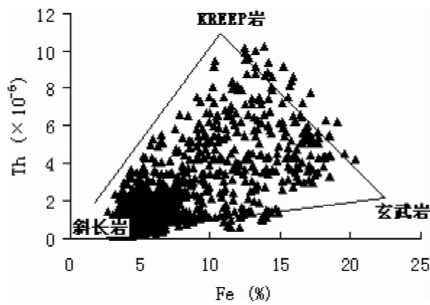


图 1 LP 伽马射线谱仪  $5^\circ$  单元的 Th、Fe 散点分布图

Fig. 1 Scattergram shows Lunar Prospector gamma-ray spectrometer data for  $5^\circ$  squares in Th, Fe compositional space.

月海玄武岩和月陆斜长岩最主要的区别是: 玄武岩富含 Fe、Ti 元素, 而斜长岩富含 Al、Ca 等元素, 由于低钛玄武岩中钛含量与斜长岩差异性不大, 因此, 一般用 Fe 含量来区分玄武岩和斜长岩, 同时, 高含量的 Mg 是确定富镁月岩的重要标志。图 2 为 LP 伽马射线谱仪以  $5^\circ \times 5^\circ$  为单位全月数据 Mg-Fe 三角解图。

## 2 Th、Fe、Mg 划分四类岩石

### 2.1 KREEP 岩的判别

富含 U、Th、K 等大离子元素是确定 KREEP 岩的重要标志, 对已有的 KREEP 岩样品化学分析表明, U、Th、K 元素的含量之间都是正相关的, U/Th 比值  $\approx 0.27$ , 而 K/Th 比值是变化的, 主要是由于 K、Th 可以富存在不同的矿物相中(Korotev, 1998)。表 1 列出了月球上主要的 KREEP 质样品 U、Th、K 元素的化学组成。

从上表可以看出, 所有的 KREEP 质月岩样品  $U > 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $Th > 5.0 \times 10^{-6}$ ,  $K > 1000 \times 10^{-6}$ , 由于 U、Th、K 元素

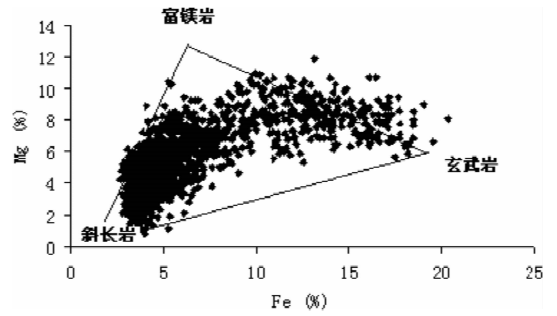


图 2 LP 伽马射线谱仪  $5^\circ$  单元的 Mg、Fe 散点分布图

Fig. 2 Scattergram shows Lunar Prospector gamma-ray spectrometer data for  $5^\circ$  squares in Mg, Fe compositional space.

的含量之间都是正相关, LP 伽马谱仪探测中, Th 元素探测的精度最高, 所以将 Th 元素的含量作为判别 KREEP 质岩的一个标志, 及  $Th > 5.0 \times 10^{-6}$  探测区域, 为 KREEP 月岩的分布区(Haskin, 1998)。

### 2.2 富镁岩 (Mg-rich rock) 的判别

Apollo 以及月球陨石样品的研究表明, 富镁月岩主要包括橄长岩、苏长岩以及橄长岩。从矿物学的角度来看, 富镁月岩主要富含橄榄石以及紫苏辉石, 可以作为判别富镁岩石矿物的标志; 从地球化学的角度来分析,  $Mg'$  ( $[Mg/(Mg + Fe)]$  的摩尔比值) 可以作为判别富镁岩石的一个重要标志, 一般将  $Mg'$  值在 75 ~ 85 的岩石作为富镁岩(Haskin and Warren, 1991; Korotev, 1998; Ouyang, 2005), 而  $Mg'$  值在 85 ~ 95 的岩石作为极富镁岩(Shearer and Papike, 2005)。因此以  $Mg' > 75$  的区域, 作为富镁岩石的分布区域。

### 2.3 月陆斜长岩(钙长岩)和月海玄武岩的判别

Apollo 15, 16 伽马射线谱仪探测近 20% 面积的月表数据分析表明, 月海区主要富集 Fe、Ti 等元素, 而月陆区主要富集 Ca、Al 等元素, 这因为月海由玄武岩充填, 而月陆由斜长岩覆盖。图 3 为典型的月海和月陆区 Fe 含量散点折线分布图。

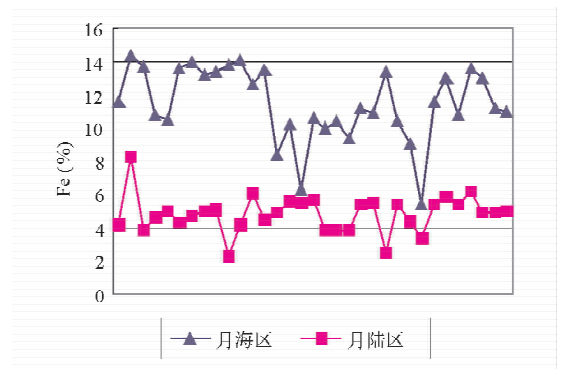


图 3 主要月海和月陆区的 Fe 含量折线图(数据来源 Davis, 1980)

Fig. 3 Fold line figure of Iron distribution on main mare and highland (data from Davis, 1980)

表1 KREEP 质月岩样品的 U、Th、K 化学成分

Table 1 U, Th, K content in lunar KREEP samples

样品	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	K ( $\times 10^{-6}$ )	文献来源
Apollo12 12032/3 样品	2.6	9.2	3362	K2
Apollo14	4.8 $\pm$ 0.6	17.6 $\pm$ 2.0	5300 $\pm$ 1000	H1, J1, R1, S1, W1, W2
Apollo14 14163 样品	3.5	13.3	4564	P1
Apollo15 A 组	4.0 $\pm$ 1.0	14.5 $\pm$ 3.8	7000 $\pm$ 3000	L3, R4, R5
Apollo15 B 组	2.1 $\pm$ 0.2	7.4 $\pm$ 0.8	2600 $\pm$ 600	D1, L3, L1, R4
Apollo15 C 组	1.7 $\pm$ 0.3	5.7 $\pm$ 0.6	2000 $\pm$ 400	L1, L3, R4, R5
Apollo15 D 组	0.9 $\pm$ 0.3	3.4 $\pm$ 0.6	1400 $\pm$ 200	L3, R2, R4
Apollo16 1F 组	2.24 $\pm$ 0.11	8.8 $\pm$ 0.6	2900 $\pm$ 300	K1
Apollo16 1F 组	2.24 $\pm$ 0.11	8.8 $\pm$ 0.6	2900 $\pm$ 300	K1
Apollo16 2DB 组	1.14 $\pm$ 0.05	4.30 $\pm$ 0.12	1590 $\pm$ 110	K1
Apollo16 超 KREEP 质岩	5 $\pm$ 3	16 $\pm$ 8	3900 $\pm$ 5100	L2
Apollo17 隐晶岩	1.43 $\pm$ 0.10	5.2 $\pm$ 0.3	1500 $\pm$ 500	J2
Apollo17 嵌晶结构岩石	1.36 $\pm$ 0.03	4.99 $\pm$ 0.08	1800 $\pm$ 200	J2
Apollo17 高 Th 岩	2.3 $\pm$ 0.2	8.5 $\pm$ 0.8	2700 $\pm$ 700	J2

文献来源: D1 为 Drake *et al.* (1973); H1 为 Hubbard *et al.* (1972); J1 为 Jolliff *et al.* (1991); J2 为 Jolliff *et al.* (1996); K1 为 Korotev (1994); K2 为 Korotev (1999); L1 为 Laul *et al.* (1988); L2 为 Lindstrom (1984); L3 为 Lindstrom *et al.* (1988); P1 为 Papike *et al.* (1982); R1 为 Rose *et al.* (1972); R2 为 Ryder (1985); R3 为 Ryder and Martinez (1991); R4 为 Ryder and Spudis (1987); R5 为 Ryder *et al.* (1988); S1 为 Scoon (1972); W1 为 Wänke *et al.* (1972); W2 为 Willis *et al.* (1972)

Fe 含量可以作为区分月陆斜长岩和月海玄武岩的重要标志,当 Fe > 6% 的区域可以认为是玄武岩分布区,而 Fe < 6% 的区域可以作为斜长岩的分布区,而 Haskin and Warren (1991) 将 FeO 含量低于 8% (即 Fe < 6.2%) 的岩石为斜长岩。

### 3 月球岩石类型分布特征

根据月球地形特征,一般将月岩分为月海玄武岩和月陆斜长岩,这在 Apollo 和 Luna 探月中,已经得到广泛的共识。

从地球化学的角度来看,由于月球某些岩石含有高含量的 U、Th、K 以及稀土,还有些岩石含有大量的 Mg,因此可从中分出 KREEP 月岩和富镁月岩。这两类月岩均为原生月岩,对于研究月球化学的演化作用有重要的研究价值。

图 4 是用 Arcgis 软件绘制出来的月球表面主要 4 类岩石分布图,采用 LP 伽马射线谱仪探测的 Fe、Mg、Th 三种元素来判别不同的岩石类型,空间分辨率为 5° × 5° (150km × 150km)。从图中可以看出,斜长岩占据了月球表面主要的区域,约 58.2%,而富镁月岩一般零星分布在斜长岩的分布区中,约 19%,这可能暗示斜长岩组成的月陆壳由于在月球

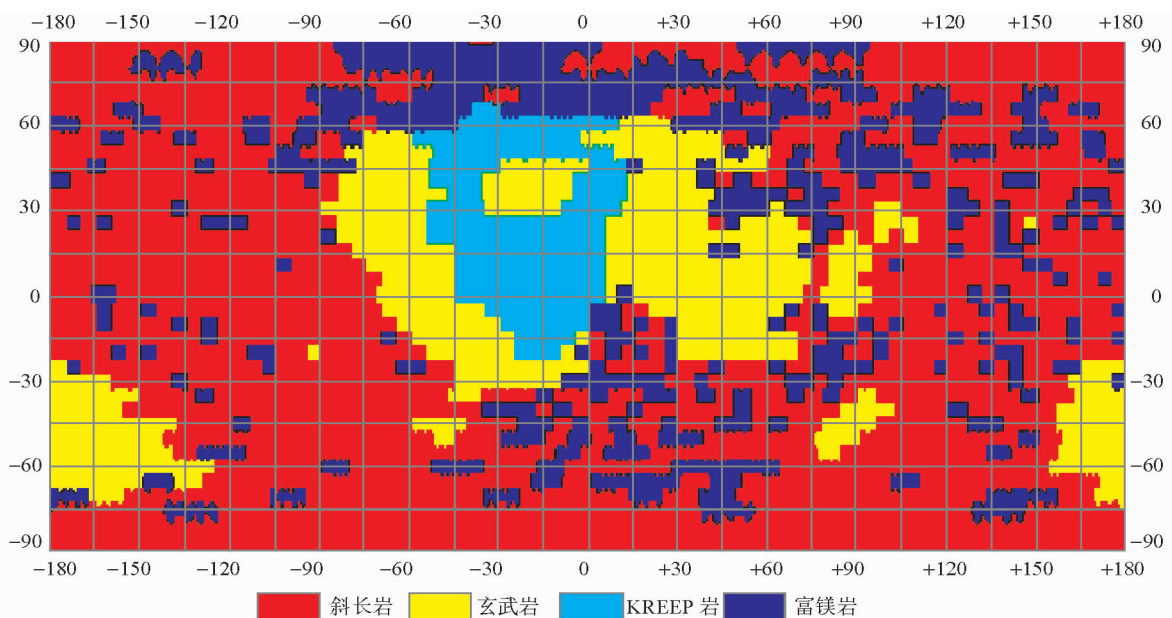


图4 月球表面岩石类型分布图(据 LP 伽马射线谱仪探测数据)

Fig. 4 Petrologic distributions on the Moon (data from LP gama-ray spectrometer)

表2 Apollo, Luna 已知样品数据和 LP 数据对比

Table 2 Data comparison between Apollo, Luna samples and LP

	经度 (°)	纬度 (°)	Fe (wt%)		Mg (wt%)		Th ( $\times 10^{-6}$ )	
			样品数据	LP	样品数据	LP	样品数据	LP
A11	0.69	23.43	12.2	9.2049	4.68	7.6178	1.94	1.5391
A12	2.45	-23.34	12	13.189	5.58	9.6535	1.9	8.8096
A14	-3.67	-17.45	8.1	12.528	5.64	9.7861	12.7	9.5048
A15	26.43	3.65	9	10.555	6.9	10.45	2.5	5.8835
A16	-9	15.5	4.3	4.2889	3.42	6.4563	2.22	1.3975
A17	20.15	30.73	10.6	10.041	6.24	8.2785	1.68	1.6769
L16	-0.69	56.3	12.9	12.363	5.28	5.8839	1.17	1.2241
L20	3.38	56.55	5.7	7.7066	5.88	5.5199	1.2	1.247
L24	12.25	62.2	15.1	8.1354	5.64	6.9473	0.36	0.91575
数据来源			Davis (1980)		McKay <i>et al.</i> (1991)		Korotev (1998)	

早期形成时遭受天体的撞击作用,使富镁月岩出露在月表,而富镁月岩一般认为是在月球原始岩浆洋中比斜长岩结晶晚的岩石 (Shearer and Papike, 2005)。KREEP 岩分布在月海玄武岩区域内,从月球地理位置上,主要位于风暴洋 (Oceanus Procellarum) 和雨海 (Mare Imbrium) 区,这与 Lawrence *et al.*, (2000) 及 Korotev (1998) 的研究结果相一致,约占 5.8% 的分布区域,玄武岩约占 17% 的分布区,主要分布在中低纬度的月球正面,在雨海的对峙区域,也有一定量的分布。

## 4 讨论

对已知的 Apollo 和 Luna 着陆点 Fe、Mg、Th 的含量与 LP 的数据对比 (表 1),这两类数据存在的关系见图 5。

根据图 5c, Th 实测值和 LP 探测值之间的关系,即当探测数据  $Th > 4.963 \times 10^{-6}$  ( $\approx 5.0 \times 10^{-6}$ ) 时,为 KREEP 岩的分布区。根据图 5a, Fe 实测值和 LP 探测值之间的关系,即当探测数据  $Fe < 8.2\%$  时,为斜长岩分布区,而  $Fe > 8.2\%$  时为玄武岩分布区。通过以上分类,绘制的月表岩石分布见图 6。

对比图 4 和图 6,可以发现,二者的主要差异性表现在月陆斜长岩和月海玄武岩的分布上。在南海 (Mare Australe), 月球地理位置为 S38.9°, E93.0°, 图 4 为玄武岩的分布区,而图 6 南海地区为斜长岩分布,因此图 4 真实的表现月球正面玄武岩的分布特征。在月球背面的智海 (Mare Ingenii), 月球地理位置为 S33.7°, E163.5°, 图 4 为大量的玄武岩的分区,而图 6 的玄武岩分布区只是零星的几个点,从这个方面来看,数据校正后的月球岩石类型分布图与月球背面地形图比较吻合。

## 5 结论

(1) 月球上主要岩石分布成以下特征: 月岩类型和月表地形特征有一定相关性,玄武岩充填广阔的月海区,主要分布在月球地理 S30° ~ N60°, W90° ~ E60° 的月球正面区域,

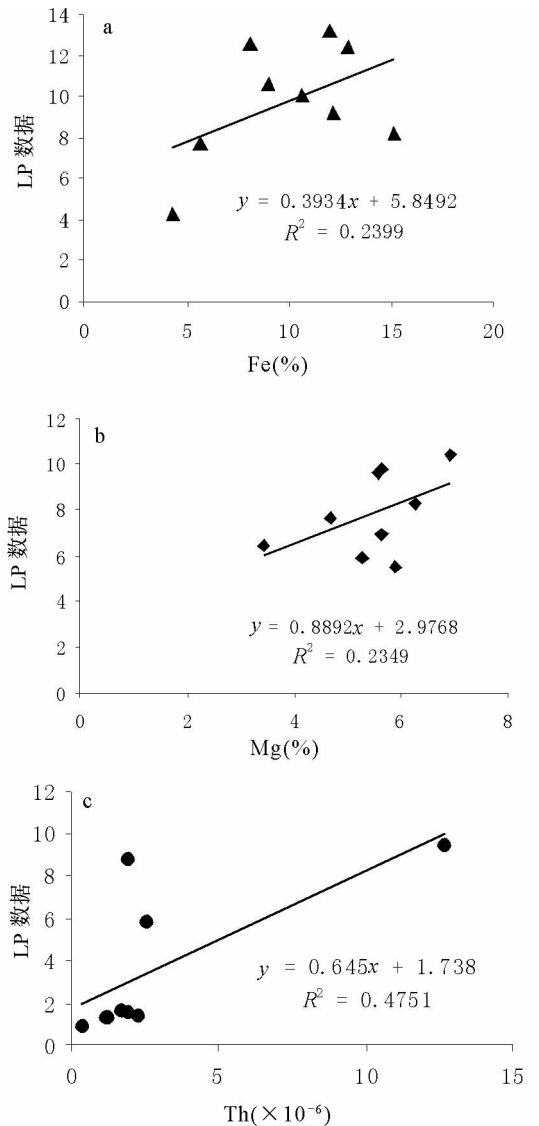


图5 Apollo 和 Luna 着陆点 Fe (a)、Mg (b)、Th (c) 含量与 LP 数据散点分布图

Fig. 5 Scattergram shows the relations of Fe (a), Mg (b), Th (c) contents on the Apollo, Luna landing sites and LP data

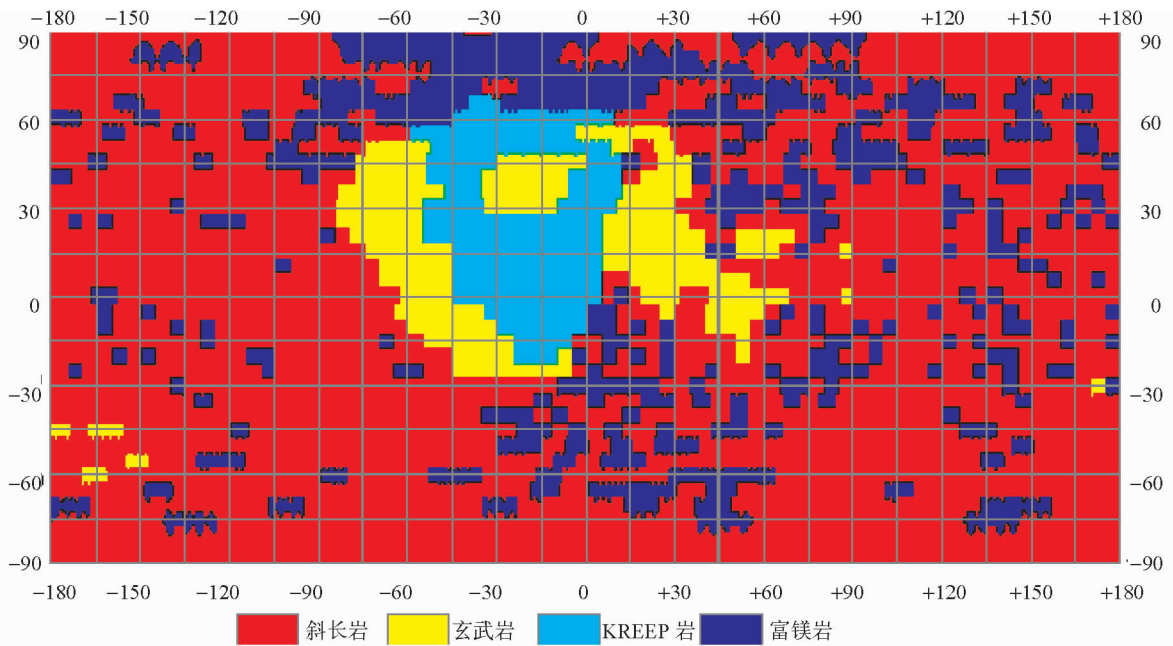


图6 数据校正后的月球岩石类型分布图

Fig.6 Petrologic distributions on the Moon after data revised

斜长岩占据绝大多数的月球表面,为月陆的主要岩石类型。

(2) KRREP 岩主要分布在雨海和风暴洋区,是月球上特殊的地体,通过对 LP 的数据分析表明, KRREP 岩在撞击作用之前,仅仅分布在雨海和风暴洋及其附近区域,而不是全球性的分布 (Korotev, 1998)。

(3) 富镁岩分布在月球陆区,统计的结果显示,分布面积略大于玄武岩,为月表的第二大类月岩。

(4) 推测的月球四类岩石形成年代大致成以下关系: 斜长岩 > 富镁岩 > KREEP 岩 > 年轻的玄武岩 (年龄 < 3.5Ga)。

(5) 将 Apollo 和 Luna 着陆点数据与 LP 探测数据校正发现,玄武岩在月表的分布有一定的变化,这可能与着陆点的数据能否代表 LP 150km × 150km 范围内的平均值有关,因此在校正时,差异性比较大。

**致谢** 本文部分图件的成图得益于中国科学院国家天文台任鑫博士提供的帮助,在此深表谢意。

## References

Berezhnoy AA, Hasebe N, Kobayashi M, Michael G and Yamashita N. 2006. Petrologic mapping of the moon using Fe, Mg and Al abundances. *Advances in Space Research*, 37:45 - 49

Davis PA. 1980. Iron and titanium distribution on the moon from orbital gamma ray spectrometry with implications for crustal evolutionary models. *Journal of Geophysical Research*, 85(B6): 3209 - 3224

Davis PA and Spudis PD. 1987. Global petrologic variations on the moon: A ternary-diagram approach. *Journal of Geophysical Research*, 92(B4): E387 - E395

Drake MJ, Stoesser JW and Goles GG. 1973. A unified approach to a fragmental problem; Petrological and geochemical studies of lithic fragments from Apollo 15 soils. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 20: 425 - 439

Haskin LA. 1998. The Imbrium impact event and the thorium distribution at the lunar highlands surface. *Journal of Geophysical Research*, 103(E1): 1679 - 1689

Haskin LA and Warren P. 1991. Lunar chemistry. In: Heiken G, Vaniman D and French BM (eds.). *Lunar sourcebook*, New York: Cambridge University Press, 357 - 474

Hubbard NJ, Cast PW, Rhodes JM, Bansal BM, Wiesmann H and Church HE. 1972. Nonmare basalt; part 2. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 5th: 1161 - 1179

Jolliff BL, Korotev RL and Haskin LA. 1991. Geochemistry of 2 ~ 4mm particles from Apollo 14 soil (14161) and implications regarding igneous components and soil-forming processes. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 21th: 193 - 219

Jolliff BL, Rockow KM, Korotev RL and Haskin LA. 1996. Lithologic distribution and geologic history of the Apollo 17 site: The record in soils and small rock particles from the highland massifs. *Meteorit. Planet. Sci.*, 31: 116 - 145

Korotev RL. 1994. Compositional variation in Apollo 16 impact-melt breccias and inferences for the geology and bombardment history of the central highlands of the moon. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 58: 3931 - 3969

Korotev RL. 1998. Concentrations of radioactive elements in lunar materials. *Journal of Geophysical Research*, 103(E1): 1691 - 1701

Korotev RL, Jolliff BL and Zeigler RA. 1999. The KREEP components of the Apollo 12 regolith. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 31th: 1363 - 1364

Laul JC, Simon SB and Papike JJ. 1988. Chemistry and petrology of the Apennine front, Apollo 15, Part II; Impact melt rocks. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 18th: 203 - 217

Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, Binder AB, Elphic RC, Maurice S, Miller MC and Prettyman TH. 1999. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface. *Geophysical Research Letters*, 26: 2681 - 2684

Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, Binder AB, Elphic RC, Maurice S, Miller MC and Prettyman TH. 2000. Thorium

- abundances on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research*, 105 (E8): 20307 – 20331
- Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, Binder AB, Elphic RC, Maurice S and Thomsen DR. 1998. Global Elemental Maps of the Moon: The Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer. *Science*, 281: 1484 – 1489
- Lawrence DJ, Feldman WC, Elphic RC, Little RC, Prettyman TH, Maurice S, Lucey PG and Binder AB. 2002. Iron abundances on the lunar surface as measured by the lunar prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *Journal of Geophysical Research*, 107 (E12): 5130 – 5155
- Li YQ, Liu JZ, Ouyang ZY, Zheng YC and Li CL. 2006. Natural radioactive thorium distribution at the lunar surface and its primary inhomogeneity of chemical composition. *Geochimica*, 35(3): 221 – 226 (in Chinese with English abstract)
- Lindstrom MM. 1984. Akkali gabbro-norite, ultra-KREEPy melt rock and the diverse suite of clasts in North Ray crater feldspathic fragmental breccia 67975. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 15th: 41 – 49
- Lindstrom MM, Marvin UB, Vetter SK and Shervais JW. 1988. Apennine front revisited: Diversity of Apollo 15 highland rock types. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 18th: 169 – 185
- Metzger E, Trombka JI, Peterson LE, Reedy RC and Arnold JR. 1973. Lunar Surface Radioactivity: Preliminary Results of the Apollo 15 and Apollo 16 Gamma-Ray Spectrometer Experiments. *Science*, 179: 800 – 803
- Mckay DS, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, Reedy R, French BM and Papike J. 1991. The lunar regolith. In: Heiken G, Vaniman D and French BM (eds.). *Lunar source book*, New York: Cambridge University Press, 289 – 356
- Ouyang ZY. 2005. Introduction to lunar sciences. Beijing: Chinese Astronautics Press, 68 – 94 (in Chinese)
- Papike LL, Simon SB and Laul JC. 1982. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20: 761 – 826
- Prettyman, TH, Feldman WC, Lawrence DJ, McKinney GW, Binder AB, Elphic RC, Gasnault OM, Maurice S and Moore KR. 2002. Library least squares analysis of Lunar Prospector gamma-ray spectra (Abstract). *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 33th: 2012
- Rose HJ, Cuttitta F, Annell CS, Carron MK, Christian RP, Dwornik EJ, Greenland LP and Ligon DT. 1972. Compositional data for twenty-one Fra Mauro lunar materials. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 3th: 1215 – 1229
- Ryder G. 1985. Catalog of Apollo 15 rocks. NASA Johnson Space Cent., Houston, Tex., JSC 20787, 1296
- Ryder G, Lindstrom M and Willis K. 1988. The reliability of macroscopic identifications of lunar coarse fines particles and the petrogenesis of 2 ~ 4mm particles in Apennine Front Sample 15243. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 18th: 219 – 239
- Ryder G and Martinez RR. 1991. Evolved hypabyssal rocks from station 7, Apennine Front, Apollo 15. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 21th: 137 – 150
- Ryder G and Spudis PD. 1987. Chemical composition and origin of Apollo 15 impact melts. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 17th, J. Geophys. Res.* 92: E331 – E339
- Scoon JH. 1972. Chemical analyses of lunar samples 14003, 14311, and 14321. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 3th: 1335 – 1336
- Shearer CK and Papike JJ. 2005. Early crustal building processes on the moon: Models for the petrogenesis of the magnesian suite. *Geochem. Cosmoch. Acta*, 69(13): 3445 – 3461
- Shkuratov YG, Kaydash VG, Stankevich DG, Starukhina LV, Pinet PC, Chevrel SD and Daydou YH. 2005. Derivation of elemental abundance maps at intermediate resolution from optical interpolation of lunar prospector gamma-ray spectrometer data. *Planetary and Space Science*, 53: 1287 – 1301
- Taylor GJ, Warren P, Ryder G, Delano J, Pieters C and Lofgren G. 1991. Lunar rocks. In: Heiken G, Vaniman D and French BM (eds). *Lunar source book*, New York: Cambridge University Press, 183 – 284
- Wänke H, Baddenhausen H, Balacescu A, Teschke F, Spettel B, Dreibus G, Palme H, Kruse H, Quijana-Rico M, Wlotzka F and Begemann. 1972. Multielement analyses of lunar samples and some implications of the results. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 3th: 1251 – 1268
- Willis JP, Erlank AJ, Gurney JJ, Theil RH and Ahrens LH. 1972. Major, minor and trace element data for Apollo 11, 12, 14 and 15 samples. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 3th: 1269 – 1273

#### 附中文参考文献

- 李泳泉, 刘建忠, 欧阳自远, 郑永春, 李春来. 2006. 月球表面天然放射性元素 Th 的分布特征及月球化学的原始不均一性. *地球化学*, 35(3): 221 – 226
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 68 – 94
- LP 伽马射线谱仪探测数据见: [http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lunarp/reduced\\_special.html](http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lunarp/reduced_special.html)