

doi:10.3799/dqkx.2015.186

月球风暴洋火山口暗物质矿物反演及地质意义

黄爽¹, 陈圣波^{1*}, 查逢丽¹, 周超¹, 黄唯实²

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

2. 辽宁省第七地质大队, 辽宁丹东 118000

摘要: 月表主要矿物的空间分布是研究月球起源及演化等科学问题的重要信息之一。以风暴洋地区为例, 根据不同矿物光谱在可见光—近红外波段的吸收特征, 使用印度 M3 (moon mineralogy mapper) 数据, 应用波谱特征拟合法 (SFF) 反演了火山口附近暗物质区域的单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和尖晶石等铁镁质矿物的分布, 反演结果显示: 风暴洋地区提取的铁镁质矿物分布较集中, 其中辉石含量较多, 橄榄石和尖晶石含量相对较少。另外着重分析了橄榄石、尖晶石与周围矿物的关系及其地质意义。将提取结果与 Lucey 用于 Clementine 影像的光学模型填图结果进行对比显示, 提取的橄榄石分布集中, 但不存在大尺度的分布, 这与本文的研究区域面积有关; 就位置而言, 二者具有较好的一致性。

关键词: 风暴洋; 火山口暗物质; 波谱特征拟合; 铁镁质矿物; 空间分布。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)12-2103-07

收稿日期: 2015-04-12

Inversion and Geological Significance of Minerals in Dark Matter of Craters of Oceanus Procellarum of Lunar Surface

Huang Shuang¹, Chen Shengbo^{1*}, Zha Fengli¹, Zhou Chao¹, Huang Weishi²

1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. 7th Battalion of the Geological Unit of Liaoning Province, Dandong 118000, China

Abstract: There are a variety of geological structures in the Oceanus Procellarum, including 43 craters, some famous lunar mares like Mare Imbrium and Mare Frigoris, and so on. Since the Oceanus Procellarum is the candidate landing area of lunar exploration for some countries, it is important to carry out the inversion of the minerals in the dark matter of craters of the area to facilitate research, exploration and utilization of lunar resources in the future. In addition, distribution of minerals on lunar surface is important since it concerns the origin and evolution of the moon. In this paper, the Oceanus Procellarum is taken as study area, the minerals in the dark matter of crater are inverted according to the spectra absorption characteristics in the visible and near-infrared bands of different minerals like clinopyroxene, orthopyroxene, olivine and spinel from M3 (moon mineralogy mapper) data by spectral feature fitting. The mafic minerals extracted from the Oceanus Procellarum are relatively concentrated. The content of pyroxene is more than spinel and olivine. And the geological significance and relationship among olivine, spinel and other extracted minerals in the vicinity are analyzed. A comparison of the mapping results of the optical model of Lucey on Clementine data reveals that the distribution of inversion results is consistent. In this paper, the extracted olivine distributed concentratively, but there is no large scale distribution, it is associated with the study area of this article.

Key words: Oceanus Procellarum; dark matter of crater; spectral feature fitting; mafic mineral; spatial distribution.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41372337, 41373068, 41490634); 国家“863”项目课题 (No.2015AA123704); 科技基础性工作专项项目 (No.Y2ZZ031000-04); 吉林大学研究生创新基金资助项目 (No.2014029)。

作者简介: 黄爽 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高 (多) 光谱地质遥感。E-mail: hsmlylife2012@163.com

* **通讯作者:** 陈圣波, E-mail: chensb0408@126.com

引用格式: 黄爽, 陈圣波, 查逢丽, 等, 2015. 月球风暴洋火山口暗物质矿物反演及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 2103-2109.

人类利用遥感数据对月球进行科学的探索分析始于 20 世纪 70 年代,阿波罗 15、16 号利用 γ 谱仪和 X 射线荧光首次估算了月球赤道附近区域的 Ti、Fe 含量.而今遥感数据在地质领域的应用已经越来越广泛,尤其在矿物信息提取方面,利用矿物光谱特征来识别矿物、提取矿物信息已经取得了很好的效果.因此,利用光谱特征分析识别矿物已经成为一种比较成熟的识别月球表面矿物种类的方法.

火山口暗物质是指月海内火山口附近反射率较低区域的玄武岩.月表岩石主要包括斜长石、辉石、钛铁矿、橄榄石、尖晶石和熔融玻璃等(Heiken *et al.*, 1991; Taylor *et al.*, 2001).这些岩石矿物在可见光—近红外波段具有明显的光谱特征,可用于提取月表的矿物分布.Clementine 卫星发射之后,获取了全月球的紫外(UV)—可见光(VIS)—近红外(NIR)多光谱数据,使得利用高空间分辨率数据提取月表矿物分布成为可能.前人已经利用比值法提取了 Aristillus、Copernicus 和 Aristarchus 陨石坑, Aitken 盆地以及风暴洋地区的矿物分布(Mouélic *et al.*, 1999; Mouélic and Langevin, 2001; Pieters *et al.*, 2001; Staid and Pieters, 2001); 闫柏琨等(2009)利用 Clementine UV/VIS 提取了月表主要矿物的含量分布,并基于月岩分析数据以及前人研究成果对提取结果进行了验证与分析.在高光谱数据方面, Klima *et al.* (2011)利用 M3(moon mineralogy mapper)数据分析了月表低钙辉石富集区的光谱特征, Isaacson *et al.* (2011)利用 M3 数据研究了月球富橄榄石岩体的光谱特征.

本文在前人工作基础上,以风暴洋地区为例,根据矿物光谱的吸收特征,使用印度 M3 数据,用波谱特征拟合法反演了火山口暗物质区域的铁镁质矿物,并着重分析了橄榄石和尖晶石的地质意义.

1 研究区及数据概况

风暴洋是月球表面最大的月海,位于月球正南北半球的西侧,东邻雨海,位置为 $60^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{S}$ 、 $80^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{W}$,面积约 500 万 km^2 .风暴洋克里普地体以玄武岩质岩石为主,范围与在风暴洋—雨海地区重新大面积出露的涉及月球早期分异的岩石组合出露的面积相一致(欧阳自远等, 2002).风暴洋中的岛屿众多,周围有较多具有明亮辐射纹的环形山.

研究选用 M3 数据, M3 是搭载于印度月船 1 号(Chandrayaan-1)上的推扫式成像光谱仪,该传感器

有两种成像模式:全球模式(Global),空间分辨率 140 m;目标模式(Target),空间分辨率 70 m.本文采用 Global 数据,其光谱范围覆盖 $0.46\sim 3.00\ \mu\text{m}$,分为 85 个波段,光谱分辨率为 20 nm 或 40 nm(Pieters *et al.*, 2009).

2 波谱特征拟合

波谱特征拟合(SFF)是一种基于吸收特征的方法,在吸收的谱段范围内应用最小二乘法对影像中的每一个像元进行吸收谷深度对比,根据吸收谷位置和深度的近似性确定该像元与该地物的相似程度,相似程度越大,该像元的光谱特征匹配结果取值也越大(周超等, 2015).为了突出某个波长范围内的光谱吸收特征,在进行 SFF 之前,将图像光谱和参考光谱进行连续统去除处理.连续统去除后的参考光谱和像元光谱在特征吸收深度上存在差异,需要通过一个常量 k 来调整参考光谱的形状,以便更好地与像元光谱进行匹配(Clark, 2003; 许宁等, 2011),公式如下:

$$L'_c = \frac{L_c + k}{1 + k}, \quad (1)$$

其中: L'_c 是变换后的参考光谱; L_c 是原参考光谱; k 为常数,且 $k \neq 1$.上式可变换为 $L'_c = aL_c + b$, 其中 $a = \frac{1}{1+k}$, $b = \frac{k}{1+k}$.已知吸收特征内的参考光谱反射率为 P'_i , 图像光谱反射率为 P_i (i 为波段号).为了获得 $P'_i = aP_i + b$ 和 P_i 的最佳拟合,利用最小二乘原理:

$$\sum (P_i - (aP'_i + b))^2 = \min, \quad (2)$$

由极值原理得:

$$a = \frac{n \sum P_i P'_i - P'_i \sum P_i}{n \sum P'_i{}^2 - [\sum P'_i]^2}, \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum P_i - a \sum P'_i}{n}, \quad (4)$$

其中: a 、 b 即为参考光谱和图像光谱的最小二乘拟合系数,通过计算 L_c 和 P_i 的相关系数 R 来表示两种光谱的拟合程度:

$$R = \frac{\text{Cov}(P_i, P'_i)}{\sqrt{D(P_i) \cdot D(P'_i)}} = \sqrt{aa'}, \quad (5)$$

$$a' = \frac{n \sum P_i P'_i - P'_i \sum P_i}{n \sum P_i^2 - [\sum P_i]^2}. \quad (6)$$

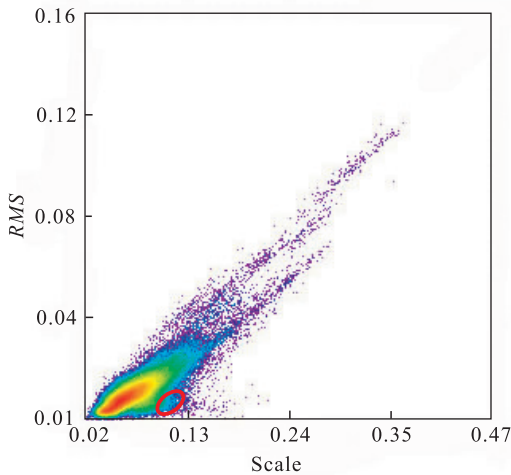


图 1 RMS 与 Scale 构成的二维散点

Fig.1 2D scatter plot about RMS and scale

在计算 R 的同时,可以得到参考光谱与每个像元光谱的均方根误差:

$$RMS = \sqrt{(1 - R)^2 \cdot D(P_i)}. \quad (7)$$

在一幅图像中确定与端元波谱匹配最好的区域,将 Scale 值即相关系数 R 和拟合误差(RMS)作为 X 、 Y 轴构成二维散点图,在散点图中,选择 RMS 值低、Scale 值高的区域作为感兴趣区(图 1),这些感兴趣区就是与端元波谱匹配最好的像素。

3 风暴洋地区铁镁矿物反演

月表主要矿物在可见光—近红外波段具有诊断性吸收特征.光谱的吸收特征主要受铁的光子传输的影响,其次是钛,另外,钙在辉石中的影响较大(Burns, 1993).

辉石是一种晶体硅酸盐矿物,富含 Fe、Mg,在火成岩与变质岩中广泛分布.月表辉石以单斜辉石为主,在风暴洋地区最为富集,斜方辉石较少(闫柏琨等, 2009).单斜辉石(Clinopyroxene, Cpx)吸收峰在 980~1 000 nm 和 2 300 nm 附近.斜方辉石(Orthopyroxene, Opx)吸收峰在 930~950 nm 和 1 900 nm 附近(Pieters *et al.*, 2001; Klima *et al.*, 2011).此外,某些玄武岩含有较高的橄榄石成分,使辉石的吸收中心稍微向长波方向移动.橄榄石(Olivine)是一种火成岩造岩矿物,尤其在基性和超基性铁镁岩中,橄榄石的反射率随着 Fe^{2+} 含量的增加和矿物粒度的增大而降低(Sunshine and Pieters, 1998),而且在 1 100 nm 附近吸收带变深变宽,特征

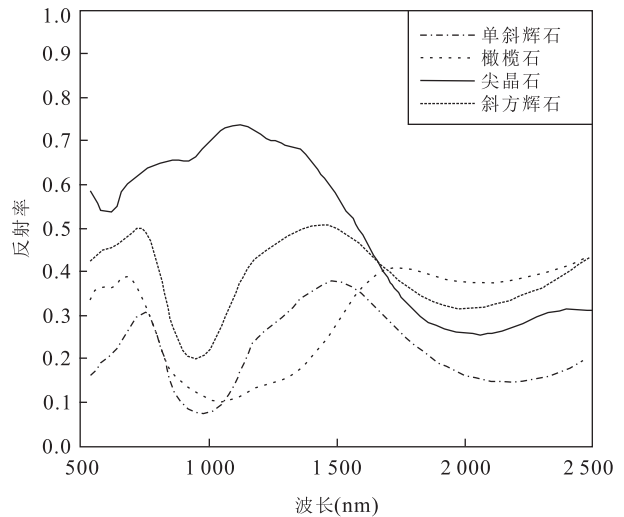


图 2 RELAB 光谱库中月表典型矿物光谱曲线

Fig.2 The spectrums of lunar typical minerals of RELAB
图中光谱引自布朗大学 NASA RELAB 实验室测量结果

明显.尖晶石(Spinel)是一种不透明矿物,成分复杂.受 Fe^{2+} 电子跃迁的影响,光谱在 2 000 nm 处有强烈的吸收特征,在 1 000 nm 处的吸收特征很弱(图 2).

波谱特征拟合选用的端元光谱来自 RELAB 光谱库,应用波谱特征拟合法获得了风暴洋火山口暗物质矿物反演结果(图 3).图 3 以 Clementine 数据作为风暴洋地区底图,位于 Clementine 数据上的矿物分布范围的标出图是矿物提取所应用的 M3 数据范围,其经纬度坐标与 Clementine 数据相同.Lucey (2004)在月球矿物填图的研究结果中指出(图 4),橄榄石多分布于月海,在高山分布较少;而斜方辉石多分布于近地面的高地和艾肯盆地.本文针对风暴洋火山口暗物质地区的矿物提取结果与 Lucey (2004)的研究成果相符,但由于本文的研究区域有限,所提取的矿物不存在大尺度的分布。

在提取出不同矿物的区域,分别选取经纬度跨度为 30' 的 a、b、c、d 4 个区域作为单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和尖晶石的代表区域进行分析(图 3).从图 5 可以看出,矿物分布比较集中,将矿物所在区域的光谱与 RELAB 光谱库中光谱对比可知, M3 数据上提取出的 4 种矿物的光谱与 RELAB 光谱库中的光谱的特征吸收位置相对应,在吸收深度上存在差异,这是因为铁、镁含量在不同地区矿物中的比例不同。

4 地质意义

在提取出的 4 种铁镁质矿物中,了解橄榄石富

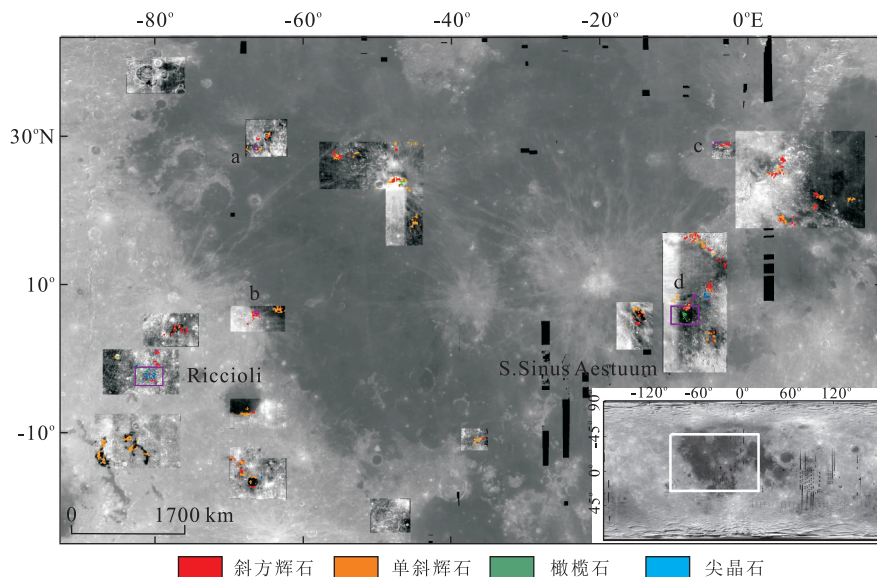
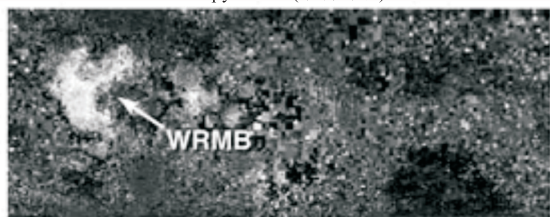


图 3 风暴洋地区暗物质矿物反演

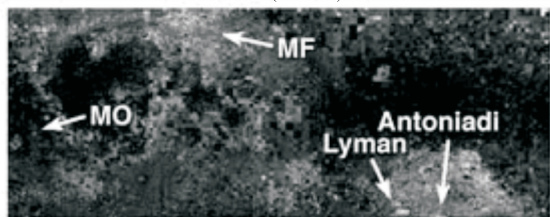
Fig.3 Minerals distribution in the dark matter of Oceanus Procellarum



Clinopyroxene(单斜辉石)



Olivine(橄榄石)



Orthopyroxene(斜方辉石)

图 4 月球硅酸盐矿物分布

Fig.4 Images of lunar silicate minerals

经度:90°W~270°E,纬度:70°N~70°S;WRMB.月海玄武岩西部地区;MO.东方海;MF.冷海;据 Lucey(2004)

榄石形成于早期的月幔,富集在月海盆地和月亮相对较薄的地区,在火山喷发过程中,随岩浆喷出,在月表出露;第 2 种观点则认为橄榄石并不是在火山喷发前形成的,而是在喷发过程中,岩浆在上涌时,其中的部分物质与火山通道中的物质发生作用结晶形成的(Yamamoto *et al.*,2010)。

风暴洋地区玄武岩是在月海泛滥期间,月球内部大量富铁和贫斜长石区域部分熔融流溢而出,并经冷却后形成的.风暴洋中提取出的橄榄石主要分为两种:一种分布在火山口附近的暗物质区域和月海盆地中,没有与尖晶石伴生,认为是在月幔中早期形成的,如 S. Sinus Aestuum 火山口附近的橄榄石(图 6a);另一种分布在风暴洋的西南部、赤道附近:与斜方辉石、尖晶石共生,是典型的“OOS”矿物组合(Pieters *et al.*,2011),如 Riccioli 火山口附近的“OOS”矿物组合(图 6b).这种矿物组合在影像中不能直接可见,只有通过各自的光谱特征识别.“OOS”组合的起源与岩浆侵入月亮与月幔的交界面有关,岩浆在侵入过程中发生分离结晶和重力沉降,使一定范围内的含铁镁的物质聚集在一起形成“OOS”矿物组合。

5 讨论与结论

根据不同矿物在可见光和近红外波段的光谱特征,反演了月球风暴洋地区的单斜辉石、斜方辉石、

集的原因,有助于大家更好地理解月球的成因与演化.目前针对这一问题存在两种观点,第 1 种认为橄

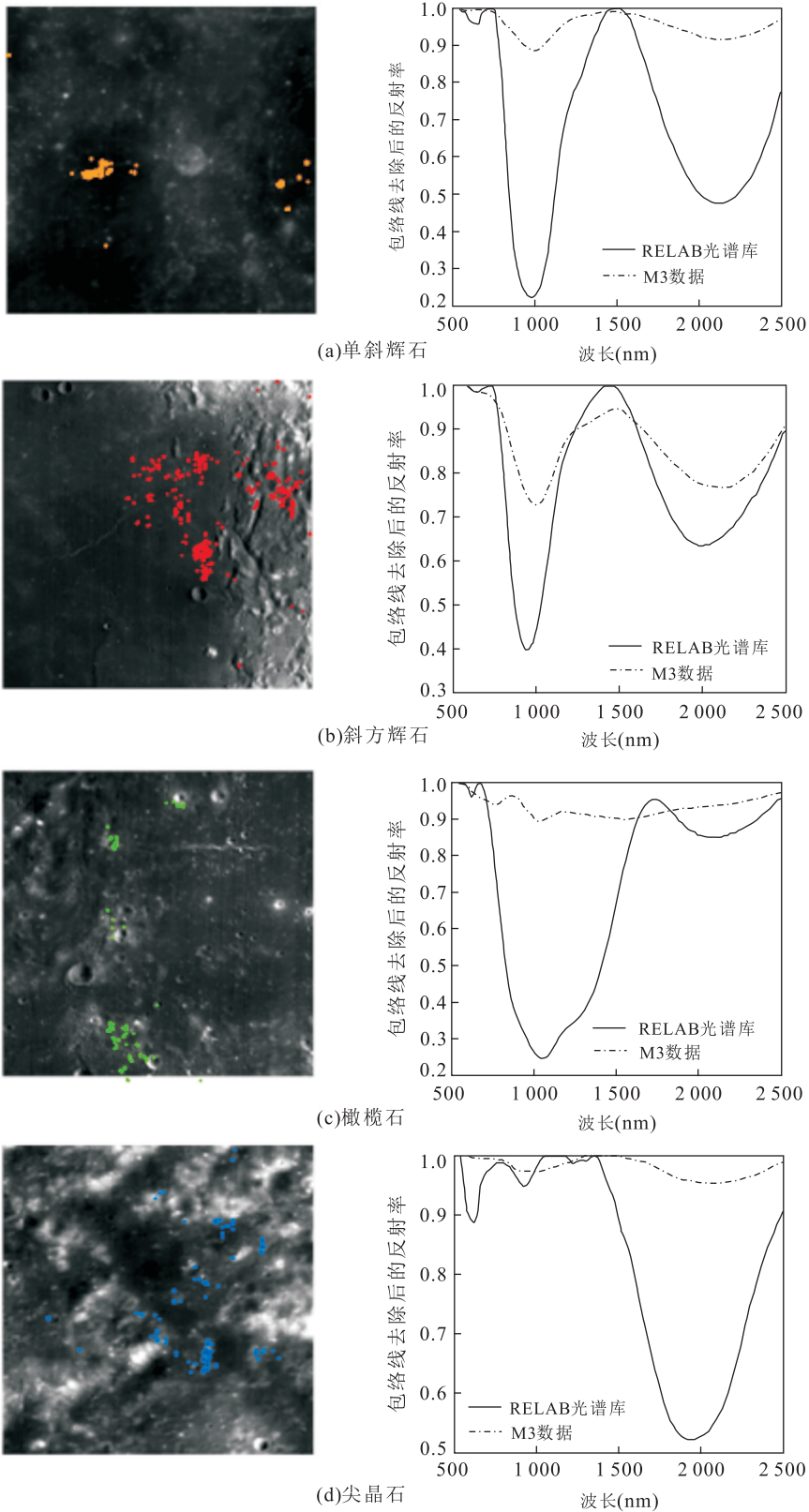


图 5 月球风暴洋地区铁镁质矿物反演分析

Fig.5 Minerals inversion analysis of Oceanus Procellarum

橄榄石和尖晶石等铁镁质矿物的分布.并以典型火山口附近的矿物分布为例,分析了橄榄石和尖晶石

的地质意义.由于大型陨石或小行星撞击月面而形成大型月海盆地,接着又在一个相当短的时间内熔

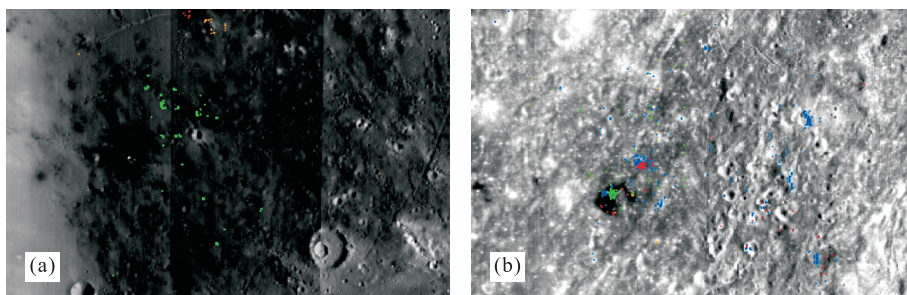


图 6 典型火山口附近矿物

Fig.6 Minerals around typical craters

a.S.Sinus Aestuum 火山口附近橄榄石;b.Riccioli 火山口附近“OOS”矿物组合

岩流喷发、溢出,使大型月海盆地得到充填形成风暴洋。

(1)月球中铁元素的存在方式是多样化的,辉石和橄榄石中有亚铁成分存在,斜长岩中含有铁杂质,陨石碎片中也含有粗粒的金属铁。镁元素则主要存在于前雨海纪岩浆分异时形成的富镁结晶岩套中,克里普岩的易变辉石中也含有少量的镁元素。风暴洋地区提取出的铁镁质矿物分布较集中,其中辉石含量较多,橄榄石和尖晶石含量相对较少。

(2)对比 M3 影像中提取出的矿物波谱与 RELAB 波谱库中的波谱可知,两者特征吸收波段的位置虽然相同,但吸收深度存在差异。这是因为铁、镁含量在不同地区矿物中的比例不同,使特定位置的吸收谱带深度不同。

(3)对于风暴洋地区橄榄石的分布与 Lucey (2004)的提取结果有所不同。本文提取的橄榄石分布集中,但不存在大尺度的分布,这与本文的研究区域面积有关。就分布位置而言,与现有的橄榄石形成观点相吻合。

References

- Burns, R.G., 1993. Mineralogical Applications of Crystal Field Theory. Cambridge University Press, New York, 44—86.
- Clark, R.N., 2003. Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems. *Journal of Geophysical Research*, 108 (E12): 1—44. doi:10.1029/2002je001847
- Heiken, G. H., Vaniman, D. T., French, B. M., 1991. Lunar Source Book: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press, New York, 123—151.
- Isaacson, P. J., Pieters, C. M., Besse, S., et al., 2011. Remote Compositional Analysis of Lunar Olivine-Rich Lithologies with Moon Mineralogy Mapper (M3) Spectra.

Journal of Geophysical Research, 116 (E6): E00G11. doi:10.1029/2010je003731

Klima, R.L., Pieters, C.M., Boardman, J.W., et al., 2011. New Insights into Lunar Petrology: Distribution and Composition of Prominent Low-Ca Pyroxene Exposures as Observed by the Moon Mineralogy Mapper (M3). *Journal of Geophysical Research*, 116 (E6): 0—6. doi:10.1029/2010je003719

Lucey, P. G., 2004. Mineral Maps of the Moon. *Geophysical Research Letters*, 31 (8): 701—704. doi:10.1029/2003GL019406

Mouélic, S.L., Langevin, Y., 2001. The Olivine at the Lunar Crater Copernicus as Seen by Clementine NIR Data. *Planetary and Space Science*, 49 (1): 65—70. doi:10.1016/s0032-0633(00)00091-x

Mouélic, S.L., Langevin, Y., Erard, S., 1999. The Distribution of Olivine in the Crater Aristarchus Inferred from Clementine NIR Data. *Geophysical Research Letters*, 26 (9): 1195—1198. doi:10.1029/1999gl900180

Ouyang, Z. Y., Zou, Y. L., Li, C. L., et al., 2002. Prospect of Exploration and Utilization of Some Lunar Resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27 (5): 498—503 (in Chinese with English abstract).

Pieters, C.M., Besse, S., Boardman, J., et al., 2011. Mg-Spinel Lithology: A New Rock Type on the Lunar Farside. *Journal of Geophysical Research*, 116, E00G08. doi:10.1029/2010je003727

Pieters, C. M., Head, J. W., Gaddis, L., et al., 2001. Rock Types of South Pole-Aitken Basin and Extent of Basaltic Volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 106 (E11): 28001. doi:10.1029/2000je001414

Pieters, C. M., Boardman, J., Buratti, B., et al., 2009. The Moon Mineralogy Mapper (M3) on Chandrayaan-1. *Current Science*, 96 (4): 500—505.

Staid, M.I., Pieters, C.M., 2001. Mineralogy of the Last Lunar

- Basalts; Results from Clementine. *Journal of Geophysical Research*, 106(E11): 27887—27990. doi: 10.1029/2000JE001387
- Sunshine, J. M., Pieters, C. M., 1998. Determining the Composition of Olivine from Reflectance Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research*, 103(E6): 13675—13688. doi: 10.1029/98JE01217
- Taylor, L. A., Pieters, C. M., Keller, L. P., et al., 2001. Lunar Mare Soils; Space Weathering and the Major Effects of Surface-Related Nanophase Fe. *Journal of Geophysical Research*, 106(E11): 27985—27999. doi: 10.1029/2000je001402
- Xu, N., Hu, Y. X., Lei, B., et al., 2011. Mineral Information Extraction for Hyperspectral Image Based on Modified Spectral Feature Fitting Algorithm. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(6): 1639—1643 (in Chinese with English abstract).
- Yamamoto, S., Nakamura, R., Matsunaga, T., et al., 2010. Possible Mantle Origin of Olivine around Lunar Impact Basins Detected by SELENE. *Nature Geoscience*, 3(8): 533—536. doi: 10.1038/ngeo897
- Yan, B. K., Gan, F. P., Wang, R. S., et al., 2009. Mineral Mapping of the Lunar Surface Using Clementine UV/VIS/NIR Data Based on Unmixing of Spectral. *Remote Sensing for Land & Resources*, (4): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C., Wang, D. M., Chen, S. B., et al., 2015. Vegetation Corrected Continuum Depths Model and Its Application in Mineral Extraction from Hyperspectral Image. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(8): 1365—1370 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等, 2002. 月球某些资源的开发利用前景. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 498—503.
- 许宁, 胡玉新, 雷斌, 等, 2011. 基于改进光谱特征拟合算法的高光谱数据矿物信息提取. *光谱学与光谱分析*, 31(6): 1639—1643.
- 闫柏琨, 甘甫平, 王润生, 等, 2009. 基于光谱分解的 Clementine UV/VIS/NIR 数据月表矿物填图. *国土资源遥感*, (4): 19—24.
- 周超, 汪大明, 陈圣波, 等, 2015. 植被覆盖区羟基和碳酸盐矿物光谱吸收深度校正模型. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(8): 1365—1370.