

## 嫦娥四号着陆点原位高光谱的太空风化研究

王振超<sup>1</sup>, 柳稼航<sup>1\*</sup>, 盛庆红<sup>1</sup>, 吴昫昭<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国科学院紫金山天文台, 江苏 南京 210034)

**摘要:** 月球表面没有大气层的保护, 岩石矿物长期在太空风化的作用下, 逐渐演化为月壤。太空风化过程是月壤产生、成熟的过程, 由于物质形态结构的改变, 导致月表光谱特征产生变化。因而, 作为风化产物的月壤的光谱特性, 包含了月表的太空风化信息。月壤成熟度, 是描述太空风化程度的重要指标, 利用高光谱遥感数据进行亚微观铁 (SMFe) 的反演进而获取月壤成熟度, 是目前研究月表太空风化的主要手段。原位探测数据, 由于没有受到其他因素的干扰, 获得的反演结果相对更加准确、可靠。我国嫦娥四号 (CE-4) 玉兔二号巡视器搭载了能直接获取月表原位高光谱数据 (450~2395 nm) 的科学载荷红外成像光谱仪, 为研究月表的太空风化提供了很好的机会。选取了 CE-4 卫星着陆器登陆点附近的两处光谱数据, 采用 Hapke 模型和光谱角匹配法对 CE-4 卫星登陆点附近月壤的 SMFe 进行了反演。根据 Morris 模型和 FeO 含量进一步反演 CE-4 卫星登陆点附近月壤的成熟度。结果表明, 该处月壤成熟度为 11.5, 较大概率为不成熟月壤。

**关键词:** 月球高光谱; Hapke 模型; 嫦娥四号; 亚微观铁含量; 成熟度

**中图分类号:** P691 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190460

## Study on space weathering of Chang'e-4 landing site by in situ spectra

Wang Zhenchao<sup>1</sup>, Liu Jiahang<sup>1\*</sup>, Sheng Qinghong<sup>1</sup>, Wu Yunzhao<sup>2</sup>

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China)

**Abstract:** Without atmosphere, the lunar surface is gradually evolved into lunar soil by the space weathering. The space weathering generates lunar soil and matures it. This progress changes the morphological structure and the spectral characteristics. Thus the spectral characteristics of lunar soil contains information about the space weathering of the moon's surface. Lunar soil maturity is an important indicator to describe the degree of the space weathering. Using hyperspectral data to produce the submicroscopic metallic iron (SMFe) and to obtain lunar maturity is an important method for studying the space weathering. Since the in situ detection data is not disturbed, the results obtained are relatively more accurate and reliable. Therefore, the Chang'e-4 (CE-4) Yutu-2 rover was equipped with a detection instrument that directly obtained the in situ hyperspectral data (450-2395 nm) of the lunar surface, which provided a good opportunity for studying the lunar weathering. Two spectral data near

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-03-28

基金项目: 南京航空航天大学高层次人才启动基金 (90YAH19103); 国家重点研发计划项目 (2016YFF0103604); 国家自然科学基金 (41471381)

作者简介: 王振超 (1984-), 男, 博士后, 主要从事高光谱遥感地质成分反演方面的研究。Email: wzhenchao@nuaa.edu.cn

通讯作者: 柳稼航 (1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事深空探测等方面的研究。Email: jhliu@nuaa.edu.cn

the landing site of the CE-4 lander were selected, using the Hapke model and the spectral angle matching method, SMFe content was produced. The maturity of the lunar soil near the landing site of the CE-4 was further inferred based on the Morris model and FeO content. The results show that the lunar soil's maturity is 11.5, indicating that it may be immature lunar soil.

**Key words:** lunar hyperspectra; Hapke model; Chang'e-4; SMFe; maturity

## 0 引言

早期认为表面几乎没有大气的月球是不存在演化的<sup>[1]</sup>,而事实上,在长期遭受宇宙射线和太阳风的照射、陨石撞击、昼夜热循环等作用,导致表面物质的物理化学性质发生改变,这种过程即太空风化。太空风化显著地改变了月球表面的光谱特征,使得月表反射率总体变低、光谱斜率增大(变红)、矿物诊断性吸收谱带普遍减弱<sup>[2-4]</sup>。产生这种变化,主要是由于微陨石的撞击和太阳风的溅射过程中汽化的铁粒子在表层的沉积作用。由于几十甚至几百纳米粒径的铁粒子对太空风化作用同样具有影响,所以早期将该铁粒子称为纳米相铁(npFe<sup>0</sup>)并不合理,而应该称为亚微观铁(SMFe)。该风化过程,随着时间的增加而变得更加显著,即成熟度越来越高。太空风化对月球表面过程、光谱特性、物质成分反演等都具有重要意义。成熟度是描述太空风化的常用指标,利用 SMFe 含量与氧化亚铁含量可以反演得到成熟度<sup>[5]</sup>。采用高光谱遥感数据结合月壤的相关参数可以反演得到月壤中 SMFe 的含量<sup>[1,6-7]</sup>。

月球原位光谱数据不足且月球代表性样品不完备,付晓辉<sup>[8]</sup>、赵哲<sup>[9]</sup>等利用 Hapke 模型对实验模拟光谱进行了太空风化分析,是对太空风化研究的重要补充。研究表明,近距离获取原位高光谱数据对于月表太空风化反演的结果更加准确可靠<sup>[7]</sup>。绕月卫星距离月面较远,由于空间分辨率较低不可避免地存在混合像元现象,进而导致光谱混合像元,使得反演结果不准确;采样返回的月球样品在采用过程中,不可避免地会发生翻动、搅动混合和孔隙度变化等物理变化,从而使得实验室测得的光谱很难代表月球表面真实光谱信息。

我国 2018 年底发射的嫦娥四号(CE-4)卫星巡视器玉兔二号搭载的红外成像光谱仪所获取的原位光谱数据,结合相关参数以及 FeO 的含量,对 CE-4 着陆点附近月壤进行太空风化研究,是继嫦娥三号(CE-3)

太空风化研究后的又一绝佳机会。相比 CE-3, CE-4 是人类首次获取月球背面原位光谱数据,对月球背面太空风化研究对人类对月球的总体完整认识具有重要意义。

## 1 嫦娥四号高光谱数据

2019 年 1 月 3 日嫦娥四号着陆器与巡视器玉兔二号成功地于月球背面(远离地球的一侧)软着陆<sup>[10]</sup>。玉兔二号目前已经正常工作至第八个月昼,搭载的红外成像光谱仪已经获取了大量的月球原位高光谱数据。红外成像光谱仪的相关参数见表 1。红外成像光谱仪包括两个通道,短波红外 SWIR 通道和可见近红外 VNIS 通道,其中 SWIR 所探测的区域为 VNIS 所探测区域的中间偏左侧内部的圆形区域。由于光谱由两个光谱通道观测范围不一致,所以需要二者进行统一。该研究对 VNIS 范围内与 SWIR 观测范围一致部分进行平均,对于原始数据去噪、平滑以及二者的整合等预处理参照参考文献 [11] 和 [12]。由于在小于 530 nm 的短波范围内光谱的信噪比较低,而在大于 2 200 nm 的长波范围内受热辐射影响较大,故该研究只采用 530~2 200 nm 波长范围内的光谱数据。

**表 1 嫦娥四号,玉兔二号红外成像光谱仪技术参数**  
**Tab.1 Parameters of the CE-4, Yutu-2 visible and near-IR imaging spectrometer (VNIS) and short-wave infrared (SWIR) spectrometer**

Parameters	VNIS	SWIR
Wavelength/nm	450-950	900-2 400
Band resolution/nm	2-10	3-12
View field/(°)	8.5×8.5	φ3.58
Numbers of valid pixel	≥256×256	1
Detective distance/m		0.7-1.3
Detective time/min		~2

在嫦娥四号的观测点中,第三个月昼共获得了十个点位的光谱数据(点 12~点 21)。为了研究嫦娥四

号登陆点附近的月壤太空风化情况,选取了两个观测点的光谱数据。通过可见光近红外成像光谱仪的影像以及短波红外的光谱数据研究发现,嫦娥四号登录后的第三月昼的所探测的点 15 的光谱为岩石光谱(见图 1)。尚未风化的岩石表面的 SMFe 含量为 0<sup>[7]</sup>,如果得到其他点的月壤 SMFe 含量与该点的差值,便可以得到相应光谱对应月壤的 SMFe 含量。为了得到可以代表 SMFe 原位赋存状态的光谱,该研究筛选掉了玉兔二号车轮碾压过的月壤光谱以及表面碎石较多或者太阳斜度较大造成表面阴影较为严重的光谱,最终选取点 20 的光谱(图 2)。由于记录的角度信息均为假设被拍摄面为水平面,而点 15 为岩石的侧上方,故该研究重新估算了点 15 的几何角度,点 15 与点 20 光谱的几何信息见表 2。

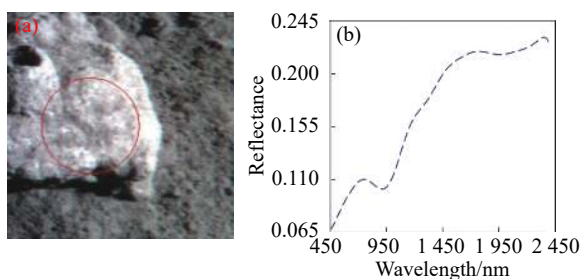


图 1 嫦娥四号 15 号观测点影像及其光谱。(a) 成像数据 (450~945 nm), 红色圆圈为短波红外数据探测范围; (b) 红圈范围内光谱

Fig.1 Image and spectra of site 15 of Chang'e-4. (a) Imaging data (450~945 nm), red circle is the scope of the SWIR data; (b) spectra inside the red circle scope

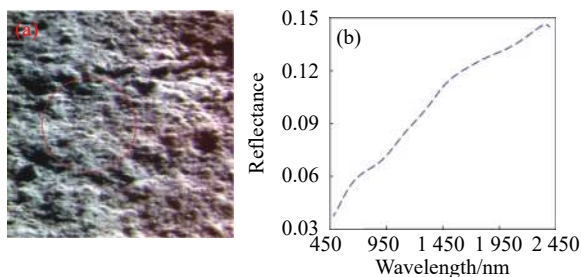


图 2 嫦娥四号 20 号观测点影像及其光谱。(a) 成像数据 (450~945 nm), 红色圆圈为短波红外数据探测范围; (b) 红圈范围内光谱

Fig.2 Image and spectra of site 20 of Chang'e-4. (a) Imaging data (450~945 nm), red circle is the scope of the SWIR data; (b) spectra inside the red circle scope

表 2 玉兔二号获取的点 15 与点 20 光谱的几何信息

Tab.2 Data acquisition conditions of Site 15 and Site 20 by Yutu-2

Parameters	Point 15	Point 20
Local time	08:32:00	15:35:00
Distance to the Sun/(AU)	0.989 146 37	0.991 539 51
View angle/(°)	17	46.26
Incident angle/(°)	70.5	64.54
View azimuth angle/(°)	143.32	83.03
Incident azimuth angle/(°)	61.48	296.66
Phase angle/(°)	65.48	104.24

## 2 反演模型

基于辐射传输理论的二相性反射传输模式的 Hapke 模型,主要表达被研究物质成分、颗粒大小以及观测几何角度的光学特性等方面的内容<sup>[1]</sup>,其公式如下:

$$REFF = \frac{\omega_{ave}}{4(\mu_0 + \mu)} * \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\mu_0, \omega_{ave}) H(\mu, \omega_{ave}) - 1 \} \quad (1)$$

式中:  $g$  为观测相位角;  $\mu_0$  为入射角  $i$  的余弦;  $\mu$  为观测角  $e$  的余弦;  $B(g)$  为后向散射函数,

$$B(g) = \frac{B_0}{1 + (1/h) \tan(g/2)} \quad (2)$$

式中:  $B_0$  为后向效应幅度,可以近似为 1<sup>[13]</sup>;  $h$  为后向效应的宽度参数,与颗粒的粒径、介质的填充因子等相关,其表达式为:

$$h = -\frac{3}{8} \ln(1 - \varphi) \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为填充因子,月壤可以约等于 0.41<sup>[14]</sup>。  $P(g)$  为单个粒子的相函数,可以由以拉格朗日多项式来定义:

$$P(g) = 1 + b \cos(g) + c(1.5 \cos^2(g) - 0.5) \quad (4)$$

式中:  $b = -0.4$ ,  $c = 0.25$ <sup>[15]</sup>。  $\omega_{ave}$  为所有成分的平均单次散射反照率 (average Single Scattering Albedo, SSA)。其表达式如下:

$$\omega_{ave} = S_e + (1 - S_e) \frac{(1 - S_i)\Theta}{1 - S_i\Theta} \quad (5)$$

$$S_e = \frac{(n_h - 1)^2 + k_h^2}{(n_h + 1)^2 + k_h^2} + 0.05 \approx \frac{(n_h - 1)^2}{(n_h + 1)^2} + 0.05 \quad (6)$$

$$S_i = 1.014 - \frac{4}{n_h(n_h + 1)^2} \quad (7)$$

$$\Theta = e^{-\alpha_w \langle D \rangle} \quad (8)$$

式中： $n_h$  和  $k_h$  分别为基质折射率指数 (refractive index) 的实部 (即折射率) 和虚部 (即消光系数)，月壤的折射率  $n_h$  为 1.7<sup>[3]</sup>，而消光系数  $k_h$  则由模型反演得到； $\alpha_w$  为吸收系数 (absorption coefficient)，其大小为  $4\pi nk/\lambda$ ， $\lambda$  为波长； $\langle D \rangle$  为光在颗粒内部的平均路径长度，在月壤中约为 30  $\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>。 $H(\mu, \omega_{\text{ave}})$  为各向同性散射函数<sup>[5]</sup>：

$$H(\mu, \omega_{\text{ave}}) = \left\{ 1 - \left( 1 - \sqrt{1 - \omega_{\text{ave}}} \right) * \mu \left[ r_0 + \left( 1 - \frac{r_0}{2} - r_0\mu \right) \ln \frac{1 + \mu}{\mu} \right] \right\}^{-1} \quad (9)$$

其中，

$$r_0 = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \omega_{\text{ave}}}} - 1 \quad (10)$$

空间风化的光谱效应是计算吸收系数  $\alpha$  的因素<sup>[4]</sup>：

$$\alpha = \frac{4\pi n_h k_h}{\lambda} + \frac{36\pi z f \rho_h}{\lambda \rho_{\text{Fe}}} \quad (11)$$

其中，

$$z = \frac{n_h^3 n_{\text{Fe}} k_{\text{Fe}}}{(n_h^2 - k_{\text{Fe}}^2 + 2n_h^2)^2 + (2n_{\text{Fe}} k_{\text{Fe}})^2} \quad (12)$$

该研究中铁的光学常数为 Paquin<sup>[17]</sup> 实验数据。 $\rho_h, \rho_{\text{Fe}}$  则分别代表基体和铁单质的密度，基体的密度本章假定为 1.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ <sup>[18]</sup>；铁的密度为 7.87  $\text{g}/\text{cm}^3$ <sup>[19]</sup>； $f$  为 SMFe 在月壤颗粒表面的质量比例。

在该研究中，首先利用 Hapke 模型反演得到尚未风化的岩石矿物光谱 (即点 15 的光谱) 对应的光谱消光系数  $k$ ，此时输入该光谱对应的各种观测角度，而吸收系数以  $4\pi nk/\lambda$  计算。然后利用计算所得的波长范围内  $k$  值在其他光谱 (即点 20 的光谱) 测定时的测光角度信息等模拟计算，此时，吸收系数  $\alpha$  增加空间风化因子。从 0 逐步增加 SMFe 的含量，计算模拟光谱与点 20 光谱的光谱角，当二者最为相等或者接近时的  $f$  便是点 20 月壤的 SMFe 含量。

### 3 结果与分析

经过模型反演，当未风化的岩石光谱 (点 15 光谱) 增加 SMFe 含量为 0.048 wt.% 时，与点 20 的光谱

拟合结果达到最佳 (见图 3)。由于点 15 的 SMFe 含量为 0，故点 20 的 SMFe 含量为 0.048 wt.%。利用 Morris<sup>[5]</sup> 的公式 (4) 定义的成熟度为：

$$(I_s / \text{FeO}) = f / (3.2 * 10^{-4} * \text{FeO}) \quad (13)$$

结合该点的 FeO 含量 13 wt.%<sup>[20]</sup>，可以得出该点的成熟度为 11.5，可能属于不成熟月壤。

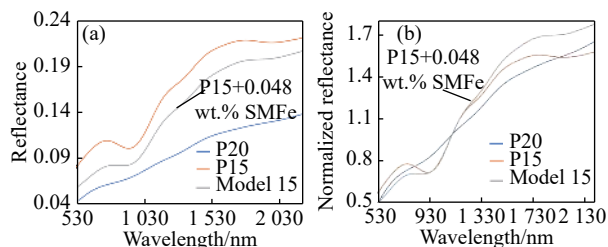


图 3 模拟光谱与所选取光谱的 (a) 原始数据与 (b) 在 1 100 nm 波长处归一化后的对照图

Fig.3 (a) Original and (b) the normalized diagram at 1 100 nm wavelength of the modeled spectra and the selected spectra

需要说明的是，该研究中假定岩石矿物的表面 SMFe 含量为 0。而事实上，岩石在风化前表面也可能存在包浆并不为 0，所以反演的 SMFe 含量可能与实际相比偏低。利用 Hapke 模型反演得到的亚微观铁粒径范围为不大于 50 nm，而 Morris 模型中采用的核磁共振敏感的亚微观铁范围仅为 4~33 nm，这就使得在反演成熟度时，结果会偏高，这在一定程度上缓解了上述假设的偏差。

前人的研究目前主要是月球正面月海的研究，而对月球背面月海高地过渡区的相关参数是否需要调整仍需进一步研究与分析。

### 参考文献：

- [1] Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] Fischer E M, Pieters C M. Remote determination of exposure degree and iron concentration of lunar soils using VIS-NIR spectroscopic methods [J]. *Icarus*, 1994, 111: 475-488.
- [3] Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon [J]. *Science*, 1995, 268(5214): 1150-1153.
- [4] Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 10039-10073.
- [5] Morris R V. Origins and size distribution of metallic iron

- particles in the lunar regolith[C]//Lunar Planet Sci Conf, 1980: 1697-1712.
- [6] Liu Dawei, Li Lin, Sun Ying. An improved radiative transfer model for estimating mineral abundance of immature and mature lunar soils [J]. *Icarus*, 2015, 253: 40–50.
- [7] Wang Zhenchao, Wu Yunzhao, Blewett D T, et al. Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang 'E-3 mission [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(3485): 3492.
- [8] Fu Xiaohui, Zou Yongliao, Zheng Yongchun, et al. Space weathering processes and effects on the Moon [J]. *Chin J Space Sci*, 2011, 31(6): 705–715.
- [9] Zhao Zhe, Zhou Ping, Yan Bokun, et al. Spectra simulation of lunar regolith based on the Hapke radiative transfer model. *Front [J]. Earth Sci*, 2016, 23(3): 266–278.
- [10] Li Chunlai, Wang Zhendong, Xu Rui, et al. The scientific information model of Chang 'e-4 visible and near-IR imaging spectrometer (VNIS) and in-flight verification [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2806.
- [11] Wu Yunzhao, Hapke B. Spectroscopic observations of the Moon at the lunar surface [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2018, 484: 145–153.
- [12] Wu Yunzhao, Wang Zhenchao, Cai Wei, et al. The absolute reflectance and new calibration site of the moon [J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(5): 213.
- [13] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory [J]. *J Geophys Res*, 1981, 86: 3039–3054.
- [14] Bowell E, Hapke B, Domingue D, et al. Applications of Photometric Models to Asteroids[M]. 2nd ed. Arizona: University of Arizona Press, 1989.
- [15] Mustard J, Pieters C. Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra [J]. *Geophys Res*, 1989, 94(13): 619–634.
- [16] Mckay D S, Cooper B L, Riofrio L M. New measurements of the particle size distribution of Apollo 11 lunar soil[C]//Lunar Planet Sci Conf, 2009.
- [17] Paquin R A. Handbook of Optics[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1995.
- [18] Houston W N, Mitchell J K, Carrier III W D. Lunar soil density and porosity[C]// Proc Lunar Planet Sci Conf, 1974: 2361-2364.
- [19] Askeland D R, Phule P P. The Science and Engineering of Materials[M]. 4 th ed. USA: Brooks/Cole Publishing/Thompson Learning, 2003.
- [20] Wu Yunzhao, Xue Bin, Zhao Baochang, et al. Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang ' E-1 IIM data [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117: E02001.