

基于辐射传输模型的月表铁镁质矿物定量反演： 以嫦娥三号着陆区为例*

孙灵芝¹ 凌宗成^{1,2**} 张江¹ 李勃¹ 郭弟均³

SUN LingZhi¹, LING ZongCheng^{1,2**}, ZHANG Jiang¹, LI Bo¹ and GUO DiJun³

1. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209

2. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

1. Institute of Space Sciences, Shandong University, Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Weihai 264209, China

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

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

2015-06-16 收稿, 2015-09-28 改回.

Sun LZ, Ling ZC, Zhang J, Li B and Guo DJ. 2016. Radiative transfer modeling of lunar mafic minerals: A case study in Chang' E-3 landing region. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1):43–52

Abstract Chang' E-3 (CE-3) landed on the young lava plain of northern Imbrium, whose compositional and mineralogical information are crucial to understand the lunar young volcanisms. According to the elemental distributions from Lunar Prospector (LP), i. e., ~19.5% FeO and ~5.2% TiO₂, the rock type of Chang' E-3 landing site could be assigned as high-FeO and medium TiO₂ mare basalts. We combined Hapke radiative transfer model and Modified Gaussian Model (MGM) to analyze the spectra of fresh craters from Moon Mineralogy Mapper (M³), and quantify the mafic minerals proportions nearby the landing region of Chang' E-3. The young lunar basalts are found to be composed of abundant clinopyroxene and relatively high content of olivine. The ratio of clinopyroxene, orthopyroxene, olivine and ilmenite is determined as 57.6 : 18.0 : 15.3 : 9.1 based on the correlated analysis of spectral library matching and MGM refinements. Our results would be compared with the in-situ mineralogical measurements by Visible and Near-infrared Imaging spectrometer aboard Chang' E-3 Yutu rover.

Key words Chang' E-3; Lunar mineralogy; Moon Mineralogy Mapper (M³); Hapke radiative transfer model; Modified Gaussian Model

摘要 我国嫦娥三号着陆于雨海北部的年轻玄武岩熔岩平原上, 该区域的物质成分和矿物组成对于理解月球年轻的火山活动具有重要研究价值。月球全球勘探者 (Lunar Prospector, LP) 探测的元素数据揭示着陆区附近岩石类型主要为高铁中钛玄武岩 (19.5% FeO; 5.2% TiO₂)。本研究利用月球矿物绘图仪 (Moon Mineralogy Mapper, M³) 获取的嫦娥三号着陆区附近的新鲜撞击坑高光谱数据, 采用 Hapke 辐射传输模型和修正高斯模型 (MGM) 联合分析, 对其年轻月海玄武岩铁镁质矿物进行了定量反演。研究表明该区域玄武岩中矿物组成以单斜辉石矿物为主, 存在较高比例的橄榄石。基于光谱库匹配方法和 MGM 优化分析, 我们反演出单斜辉石, 斜方辉石, 橄榄石和钛铁矿四种矿物的相对体积比为 57.6 : 18.0 : 15.3 : 9.1, 这一研究结果有待于与嫦娥三号玉兔号月球车上搭载的红外成像光谱仪数据进行比对, 以期从遥感和就位探测两个角度获得对于

* 本文受国家自然科学基金项目 (41490634, 41473065, U1231103, 41373068)、中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-603)、中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金项目和山东大学 (威海) 青年学者未来计划 (2015WHWLJH14) 联合资助。

第一作者简介: 孙灵芝, 女, 1990 年生, 硕士生, 月球与行星科学专业, E-mail: sunlz@mail.sdu.edu.cn

** 通讯作者: 凌宗成, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 月球与行星科学专业, 主要从事行星遥感与光谱学、陨石学与天体化学、行星样品与环境模拟等研究, E-mail: zcling@sdu.edu.cn

该地区矿物和岩石类型的全面认识。

关键词 嫦娥三号;月球矿物;月球矿物绘图仪(M³);Hapke 辐射传输模型;修正高斯模型

中图分类号 P691

1 引言

月海地区经历了多期次玄武岩充填事件,其成分和矿物具有多样性,不同的矿物模式和分布对于理解月球火山活动历史有重要意义(Shearer *et al.*, 2006; 许延波等, 2012)。早期地基望远镜研究发现风暴洋和雨海北部的暗色玄武岩多喷发于爱拉托逊纪(0.8~3.2Ga, Stöfler *et al.*, 2006),属于较为年轻的高铁高钛玄武岩(Pieters *et al.*, 1980; Thiessen *et al.*, 2014)。近年来的月球轨道遥感研究(如 Clementine UVVIS, M³ 等)获得了这些月球晚期火山喷发的玄武岩的更精确的光谱特征,而且确认其存在一定含量的橄榄石或者富铁的玻璃矿物(Staid and Pieters, 2001; Staid *et al.*, 2011; Thiessen *et al.*, 2014)。Apollo 和 Luna 计划返回的月海玄武岩样品年龄一般在 3.1~4.3Ga 之间,因而这些样品并不包括月表最年轻的玄武岩(主要位于月球正面西侧,如风暴洋和雨海)(Lunar and Institute, 1981; Staid *et al.*, 2011)。我国嫦娥三号即着陆于雨海北部的这种“特殊”的年轻高铁高钛玄武岩单元上(340.49°E, 44.12°N)进行就位探测,因而具有重要的研究价值(Xiao *et al.*, 2015; Morota *et al.*, 2011)。

遥感探测能够获取全月范围内的高光谱和高空间分辨率图像(如嫦娥一号干涉成像光谱仪(IIM), Kaguya Multiband Imager, M³ 等),极大地拓展了我们对月球的认知范围。月壤是由月表岩石经历数十亿年的撞击和空间风化作用形成,因此月表遥感探测获取的月壤光谱通常存在明显的矿物混合效应。从混合光谱中解算出矿物含量或者矿物模式的过程,即为矿物反演(Hapke, 2005)。前人已有的基于光谱数据的矿物反演方法主要包括:1)辐射传输模型,由 Hapke 在 1981 年提出,可以定量描述电磁波与土壤等粉末介质相互作用的物理过程(Hapke, 1981)。Clark *et al.* (2001) 利用辐射传输模型和遥感数据,对小天体 Eros 上的 Psyche 撞击坑矿物进行了定量反演;Lawrence and Lucey(2007)拓展了 Clark *et al.* (2001)的方法,特别考虑加入粗粒 Fe-Ni 金属的光谱效应,应用于小行星 4 Vesta 表面矿物反演研究;Cahill and Lucey(2007)将辐射传输模型应用于 Clementine UVVIS 月球遥感数据,获得了月球 Bullialdus 撞击坑中央峰较为可靠的矿物组成;2)修正高斯模型(Modified Gaussian Model, MGM),由 Sunshine *et al.* (1990)通过对高斯模型的改进得到,可以直接对光谱的吸收峰进行解算,不依赖端元矿物,而且受颗粒粒径的影响较小。如 Sunshine and Pieters(1993, 1998)提出了对辉石和橄榄石矿物反射率光谱的 MGM 解混方法,分别得到其矿物模式比例;Noble *et al.* (2006)利用

MGM 分析了实验室月壤(LSCC)的矿物含量,表明 MGM 可用于区分不同空间风化程度月壤中的单斜辉石和低钙辉石比例;3)统计分析方法。如,根据偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR),Li(2006)利用月壤光谱吸收率与矿物含量之间的线性关联,拟合出实验室月壤光谱的主要矿物和成分含量。李婵等(2013)基于 MGM 分析和 Hapke 辐射传输模型反演得到了月球虹湾地区的辉石和橄榄石填图,但其精度有待更多实测数据的检验。

本研究基于 LP 获取的元素数据和 M³ 光谱数据,对嫦娥三号着陆地区的岩石类型和矿物组成进行研究。研究主要利用 M³ 获取的嫦娥三号着陆区附近的新鲜撞击坑高光数据,以 Hapke 辐射传输模型为主建立矿物混合光谱库,对嫦娥三号着陆区附近的矿物进行定量反演,并结合修正高斯模型进一步约束,最终获得该区域月海玄武岩的矿物模式。

2 研究数据及处理

M³ 是美国 NASA 研制的高光谱成像仪,2008 年 10 月搭载印度的月船一号升空。M³ 有两个工作模式:全球模式和目标模式。在全球模式下,M³ 可以在 100km 的月球轨道上获取空间分辨率为 140m/pixel、共 85 个波段的数据,光谱上具有覆盖范围广(430~3000nm)和分辨率高(20~40nm)的优点(Green *et al.*, 2011),是目前月球探测水平最高的高光谱仪器,适用于开展月表矿物反演研究。我们共筛选了 5 轨来自 OP1b(4 轨)和 OP2a(1 轨)这两个光学周期的图像(Green *et al.*, 2011),对所有数据进行了地面真值校正、几何校正和数据镶嵌等处理,获得嫦娥三号着陆区附近的光谱图像(图 1)。

3 嫦娥三号着陆区地质背景和光谱特征

图 1a 为雨海北部的 1508nm 反射率图像,可以看出嫦娥三号着陆区(图 1a 中白色箭头指示的位置)位于年轻的高钛玄武岩边缘(I22, ~2.0Ga, Morota *et al.*, 2011),靠近北部较古老的低钛玄武岩(I5, ~3.5Ga, Hiesinger *et al.*, 2000)。LP 数据获取的嫦娥三号着陆区附近 FeO 和 TiO₂ 含量分别为 19.5% 和 5.2%(Prettyman *et al.*, 2006),因此该区域的玄武岩主要为高铁中钛成分(凌宗成等, 2014; 乔乐等, 2013)。我们利用孙灵芝等(2014)表 1 给出的参数计算了该区域在 1000nm 和 2000nm 附近的积分吸收深度(Integrated Band Depth, IBD),并做出了假彩色图(图 1b),其中 R =

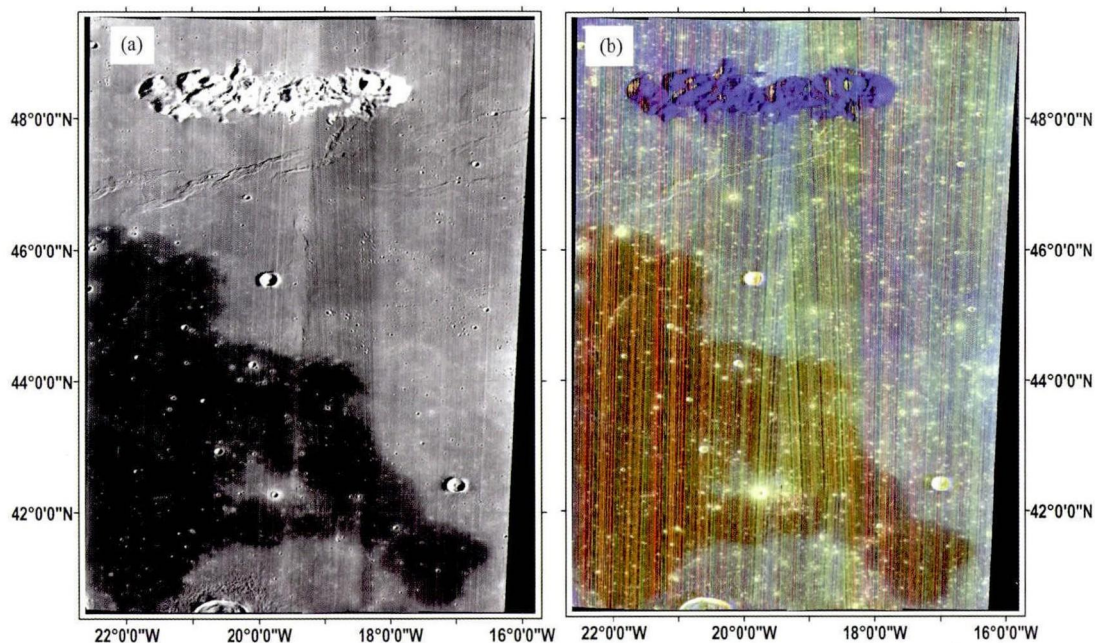


图1 M³ 数据镶嵌的雨海北部地区

(a) 1508nm 反射率图像,白色箭头指示嫦娥三号着陆区位置;(b) 假彩色图,R:IBD 1000,G:IBD 2000,B:1508nm 反射率

Fig. 1 M³ mosaic of northern Mare Imbrium region

(a) 1508 nm image; (b) false color image, R: IBD 1000, G: IBD 2000, B: 1508nm reflectance

表1 端元矿物光谱数据(单斜辉石和斜方辉石参考 Li and Li, 2011)

Table 1 Reflectance spectra of all the end members (the spectra of clinopyroxene and orthopyroxene are from Li and Li, 2011)

矿物名称	光谱名称	粒径范围 (μm)	粒径 (μm)	光谱来源
单斜辉石(cpx)	Augite NMNH120049	400	35	USGS
	Enstatite NMNH128288	25	25	USGS
斜方辉石(opx)	Hypersthene PYX02. A	10~20	15	USGS
	Bronzite HS9. 3B	260	260	USGS
橄榄石(oli)	LS-CMP-006	250~500	370	RELAB
钛铁矿(ilm)	MR-MSR-006	0~20	11	RELAB

IBD1000,G = IBD2000,B = 1508nm 的反射率。从假彩色图中可以看出,南北两个地质单元都富含铁镁质矿物,但是有明显的成分差异:南部单元偏橙红色,这是由于该地区光谱存在 1000nm 和 2000nm 的吸收特征,而且 1000nm 的吸收强度要比 2000nm 明显增强,这揭示该区域的铁镁质矿物除辉石之外,还有可能存在一定量的橄榄石矿物分布;北部单元偏黄绿色,表明 1000nm 和 2000nm 的吸收强度相当,主要以辉石矿物为主(Thiessen *et al.*, 2014; Staid *et al.*, 2011; Staid and Pieters, 2001)。其中位于北部的条状区域在 RGB 图上呈现为蓝色,说明这里在 1000nm 和 2000nm 都没有明显吸收

特征,而且拥有较高的反射率,应以高地斜长石矿物为主(Thiessen *et al.*, 2014)。

为了研究嫦娥三号着陆区附近的主要矿物模式和分布,我们结合月球轨道勘察器窄角相机(LROC NAC)获取的高空间分辨率影像图和 M³ 高光谱数据,提取了这一区域附近的、位于高钛玄武岩单元内的 16 个小撞击坑(800m > 直径 > 300m)坑壁光谱。之所以选取小撞击坑光谱,一方面是考虑小撞击坑并未穿透玄武岩岩层,可以代表嫦娥三号着陆区物质成分;另一方面是由于其经受的空间风化效应相对周围月壤较弱,光谱吸收特征更为明显。选取的小撞击坑分布情况如图 2 所示,嫦娥三号着陆点位于撞击坑 C1 的边缘。同时,为了提高抽取光谱数据的信噪比,撞击坑光谱使用 2 个像元做空间光谱平均,然后利用 Savitzky-Golay (SG) 方法进行了光谱平滑处理。为了对比凸显吸收特征,我们对所有光谱进行了去连续统处理,其中 1000nm 处的连续统为过 700nm 和 1658nm 的直线,2000nm 处的连续统为过 1658nm 和 2576nm 的直线。图 3 给出了这 16 个小撞击坑的经过处理后的光谱。

月表矿物的主要吸收特征总结如下:辉石类矿物在 1000nm 和 2000nm 附近各有一个吸收峰,而且单斜辉石的 1000nm 和 2000nm 处的吸收中心波长都要比斜方辉石要长;橄榄石在 1050nm 附近存在一个较宽的吸收,是由位于 800nm、1100nm 和 1300nm 的三个吸收叠加形成的,而在 2000nm 附近没有明显吸收特征(Pieters and Englert, 1993)。图 3 显示所有的光谱都有明显的辉石吸收特征,其中 1000nm 的吸收强度明显大于 2000nm,可能为橄榄石与辉石

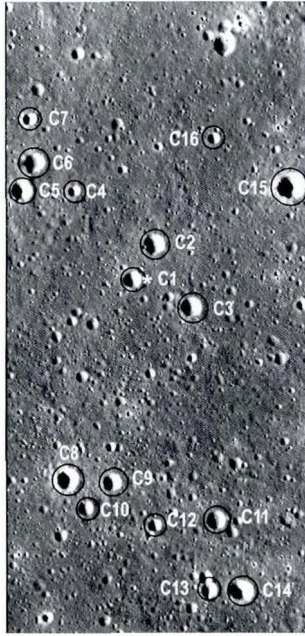


图2 嫦娥三号着陆区附近 16 个小撞击坑的分布
其中白色星号指示嫦娥三号着陆点所在位置,底图为 LROC
NAC 获取图像

Fig.2 Distributions of 16 studied craters nearby landing region of
CE-3

Landing region of CE-3 indicated by the white star symbol, and the
base map is from LROC NAC

矿物叠加吸收的结果,1000nm 吸收特征的中心峰位位于 1000nm 左右,代表该区域的辉石矿物应该以单斜辉石为主而非斜方辉石。来自 C2、C5、C7、C8、C14 和 C15 这 6 个撞击坑的光谱在 1300nm 附近的吸收较弱,可能橄榄石含量很少甚至不含橄榄石矿物;而来自其他的撞击坑的光谱都表现出一定强度的 1300nm 附近的吸收,这些区域有一定量的橄榄石分布。

4 矿物混合模型

4.1 Hapke 辐射传输模型及参数

辐射传输模型主要用于描述电磁波在介质中的变化,在混合矿物光谱的解算和定量反演方面有重要的应用价值(Hapke, 2005)。Hapke (1981, 2001) 假设所有粒子的直径远大于光谱的波长,则辐射传输模型可以表述为:

$$R_f = \frac{\omega}{4} \frac{1}{\mu_0 + \mu} \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\mu_0, \omega) H(\mu, \omega) - 1 \} \tag{1}$$

其中 R_f 为介质表面的反射率因子 (reflectance factor), ω 为所有矿物的平均单次散射反照率 (Single Scattering Albedo, SSA), μ_0 是入射角 (i) 的余弦值,即 $\mu_0 = \cos(i)$, μ 是出射角 (e) 的余弦值,即 $\mu = \cos(e)$, g 为相角;本文中数据的观测几

何为 $i = 30^\circ, e = 0^\circ, g = 30^\circ$ (Lucey, 1998; Li and Li, 2011)。

矿物的平均 SSA 由公式(2)计算:

$$\omega_{ave} = \sum_i \frac{M_i \omega_i}{\rho_i d_i} / \sum_i \frac{M_i}{\rho_i d_i} \tag{2}$$

其中 ω_{ave} 为平均 SSA, i 为第 i 种矿物, $M_i, \omega_i, \rho_i, d_i$ 分别为第 i 种矿物的质量分数, SSA, 密度以及平均粒子直径 (Li and Li, 2011)。

Hapke 模型中(公式 1) 包括了三个方程,其一是后向散射方程 $B(g)$, 主要用来定义粗糙表面的亮度随小相角减小的增大量,其公式为:

$$B(g) = 1 / [1 + (1/h) \tan(g/2)] \tag{3}$$

其中 h 是后向散射效应的角宽度,可以用 $h = -3/8 \ln(1 - \varphi)$ 来估算,对月壤来说, φ 约为 0.41 (Li and Li, 2011; Bowell et al., 1989)。

第二个方程是相角方程 $P(g)$, 主要由勒让德多项式构成, b 和 c 分别为 -0.4 和 0.25 (Li and Li, 2011; Mustard and Pieters, 1989):

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

第三个是 H 函数,由 Hapke(2005) 给出:

$$H(x, w) = \{ 1 - (1 - \gamma)x[r_0 + (1 - r_0/2 - r_0x) \ln[(1+x)/x]] \}^{-1} \tag{5}$$

$$\gamma = \sqrt{1 - w} \tag{6}$$

$$r_0 = (1 - \gamma) / (1 + \gamma) \tag{7}$$

公式(5)中, x 代表入射角或者出射角的余弦值, w 为 SSA。其中的 γ 和 r_0 分别由公式(6)和公式(7)给出。

4.2 矿物混合模型

考虑到嫦娥三号着陆区高铁中钛的成分特征,我们主要采用单斜辉石,斜方辉石、铁橄榄石以及钛铁矿这四种玄武岩矿物来进行铁镁质矿物的反演,其中斜方辉石矿物采用了三种端元光谱,橄榄石矿物主要采用了铁橄榄石光谱。这些端元光谱数据分别来自美国 RELAB 实验室和美国地质调查局(USGS)的光谱库(表 1)。为了便于与 M^3 数据进行光谱匹配,我们将所有端元矿物的光谱重采样到了 M^3 的波长,波长范围从 540nm 到 2600nm,端元的反射率光谱见图 4。三种斜方辉石矿物首先利用 Hapke 辐射传输模型转化为单次散射反照率 SSA(公式 1),然后根据 Hapke 矿物混合公式(公式 2),对三种矿物的 SSA 按照等体积比进行平均,将平均后的 SSA 作为斜方辉石矿物的端元光谱。

我们的矿物正演和反演流程如图 5 所示,其中正演就是利用端元矿物光谱建立矿物混合光谱库的过程,反演就是未知光谱与光谱库中数据进行匹配并得到矿物含量的过程。首先利用 Hapke 辐射传输模型将所有端元矿物的反射率转化为 SSA,然后结合矿物含量表和粒子平均直径,利用公式(2)进行不同体积比例的矿物端元混合,并建立光谱库。其中,单斜辉石、斜方辉石和橄榄石的含量范围都定义为 0 ~ 100vol %, 钛铁矿含量范围为 0 ~ 20vol %, 矿物反演的精度为

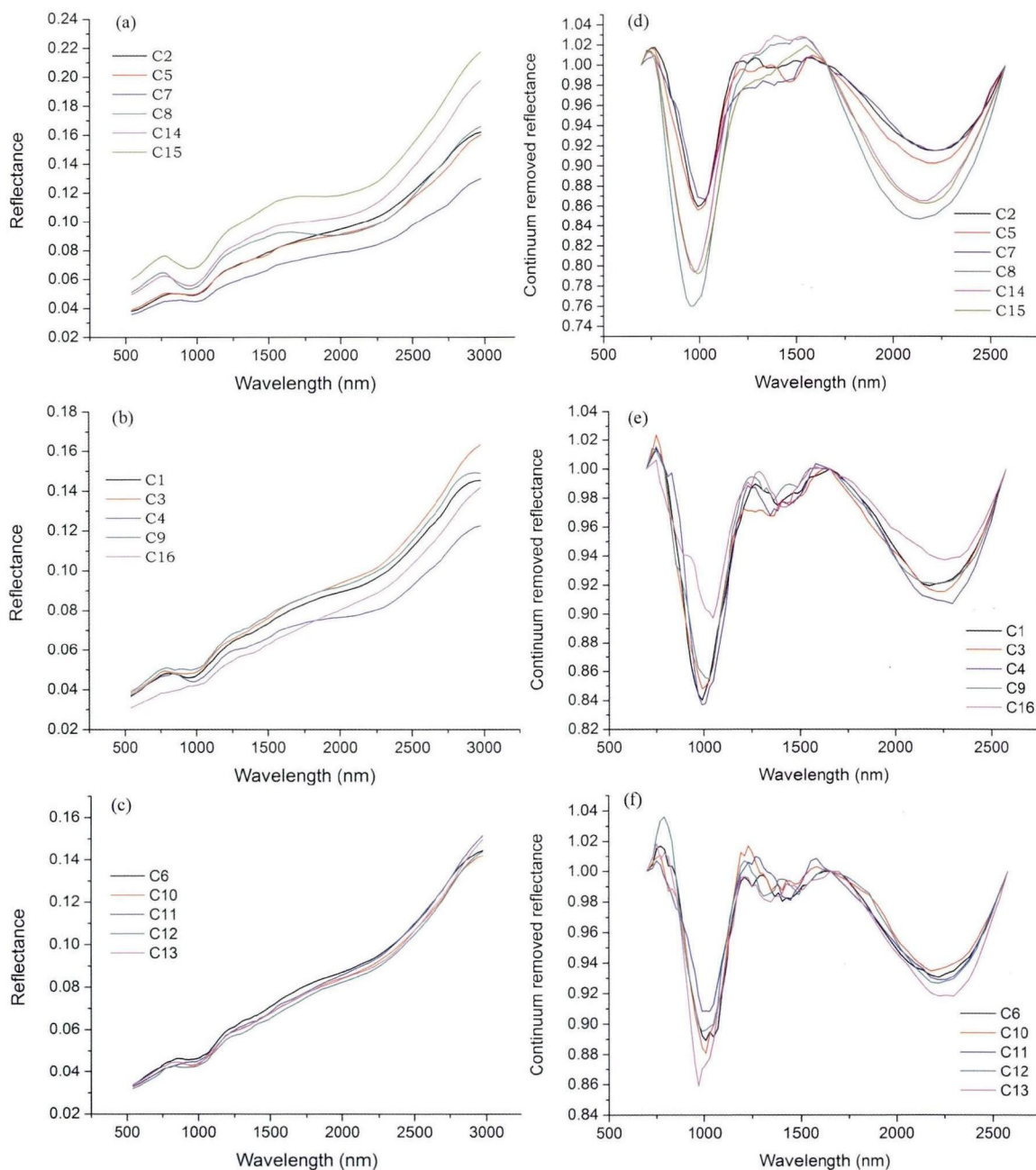


图3 平滑后的16个撞击坑光谱

(a-c)为反射率光谱;(d-f)为去连续统后的反射率光谱,其中连续统为过700nm,1658nm和2576nm三点的折线

Fig. 3 The smoothed spectra of 16 craters in this study

(a-c) the reflectance spectra; (d-f) continuum removed reflectance spectra, and the continuum is a fold-line defined by 700nm, 1658nm and 2576nm

5vol%。最后,通过光谱匹配,可以对任意一条未知的M³光谱进行反演并得到相应的矿物模式。

4.3 基于Hapke模型的嫦娥三号着陆区矿物分布

通过Hapke辐射传输模型对嫦娥三号着陆区附近小撞击坑的矿物进行反演,以得到几种主要铁镁质矿物的相对含

量大小和比例。为了抑制M³光谱的成熟度效应,在光谱匹配之前,首先去除了观测光谱的连续统。根据不同矿物的光谱谱型特征,我们采用两种连续统去除方法。对于没有明显橄榄石吸收特征的光谱,1000nm附近的连续统由750nm和1508nm两点定义,2000nm附近的连续统由1578nm和2576nm两点定义;而对于存在橄榄石吸收特征的光谱,1000nm附近的连续统由700nm和1658nm两点定义,而

表 2 四种铁镁质矿物含量的反演结果(相对体积百分数 vol%)

Table 2 The proportions of four mafic minerals (vol%)

撞击坑	直径(m)	单斜辉石*	斜方辉石*	单斜辉石(MGM)	斜方辉石(MGM)	橄榄石*	钛铁矿*
C1	510	40	25	51	14	25	10
C2	600	50	40	69	21	0	10
C3	600	40	25	53	12	25	10
C4	345	45	20	51	14	25	10
C5	540	45	35	62	18	10	10
C6	525	35	40	58	17	15	10
C7	375	40	30	54	16	20	10
C8	570	50	45	66	29	0	5
C9	510	45	30	56	19	15	10
C10	390	35	35	52	18	20	10
C11	510	30	40	54	16	20	10
C12	330	35	40	58	17	15	10
C13	330	40	35	59	16	15	10
C14	615	40	55	68	27	0	5
C15	780	40	45	64	21	10	5
C16	315	25	35	47	13	30	10
平均值	490.3	39.7	35.9	57.6	18.0	15.3	9.1

注:标*的矿物含量由 Hapke 辐射传输模型反演得到

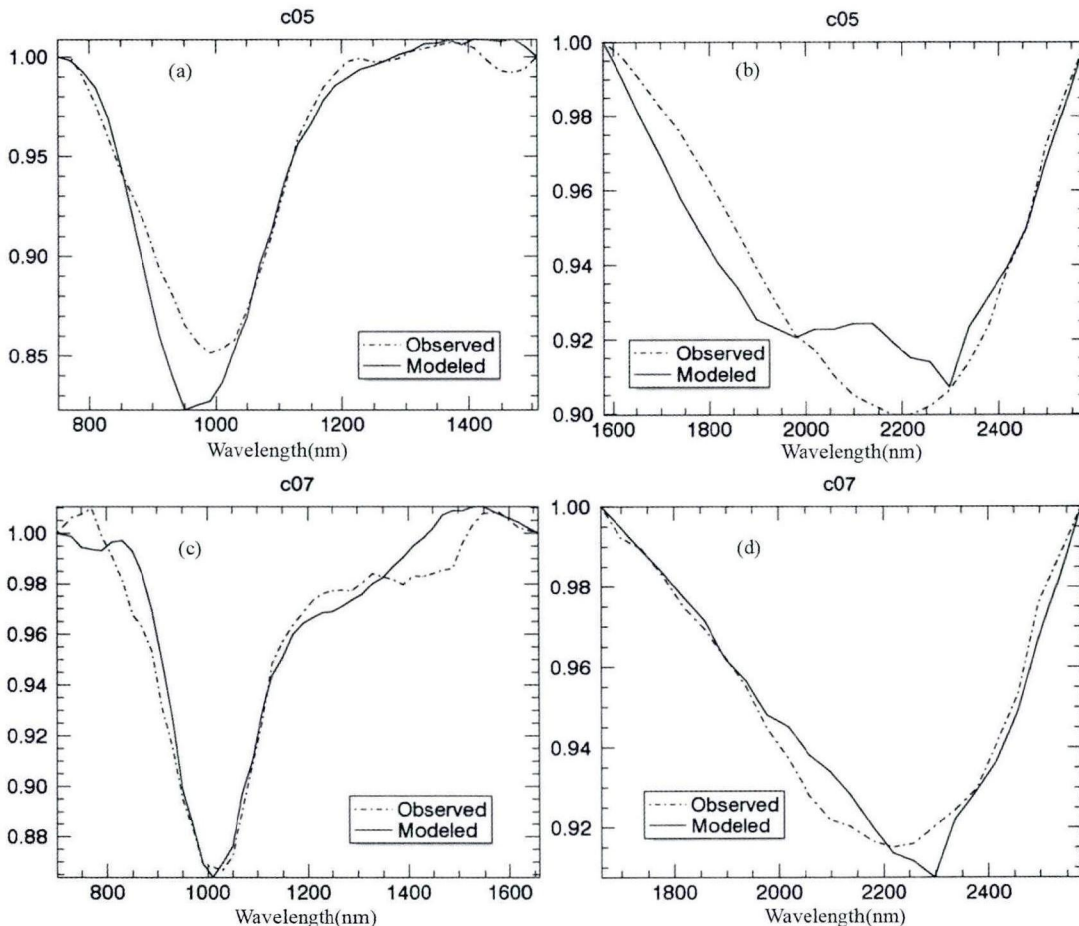


图 6 以 C5 和 C7 为例的光谱匹配结果

C5 的连续统由 750nm, 1508nm 和 2576nm 三点定义并去除, (a, b) 为 C5 分别在 1000nm 和 2000nm 附近的光谱匹配结果. C7 的连续统由 700nm, 1658nm 和 2576nm 三点定义并去除, (c, d) 分别为 C7 在 1000nm, 2000nm 附近的光谱匹配结果. 虚线表示观测光谱, 实线为光谱库中的模型光谱. C5 和 C7 拟合结果的 RMS 分别为 0.62 和 0.47, 相关系数分别为 0.97 和 0.98

Fig. 6 The spectral match result of continuum-removed spectra, e. g., C5 and C7

The continuum of C5 is a fold-line defined by 750nm, 1508nm and 2576nm, (a, b) are the spectral matching result of C5 in 1000nm and 2000nm respectively. The continuum of C7 is defined by 700nm, 1658nm and 2576nm, (c, d) are the spectral matching result of C7 in 1000nm and 2000nm respectively. The dashed line is the observed M³ spectra, and the solid line is the modeled spectra. The RMS of C5 and C7 are 0.62 and 0.47, and the correlation coefficients are 0.97 and 0.98

表3 16个撞击坑的波段吸收强度(MGM分析得到)、CBSR参数以及由CBSR值对应的单斜辉石在辉石中的比例

Table 3 The band strengths (derived from MGM analysis), CSBR parameters and the percent ratio of clinopyroxene in pyroxenes of the 16 craters in this study

撞击坑	波段吸收强度($\times 10^{-2}$)				CBSR		单斜辉石比例(%)	
	0.9 μm	1 μm	2 μm	2.3 μm	1 μm	2 μm	1 μm	2 μm
C1	-6.5	-11.9	-5.0	-7.8	0.55	0.64	81.1	78.4
C2	-7.9	-12.7	-5.9	-8.1	0.62	0.72	79.7	76.7
C3	-6.2	-13.5	-4.2	-8.6	0.46	0.49	83.2	81.9
C4	-6.7	-15.2	-6.7	-10.1	0.44	0.66	83.6	78.2
C5	-7.3	-13.6	-6.8	-9.7	0.54	0.70	81.5	77.1
C6	-0.5	-11.6	-4.4	-6.3	0.04	0.69	91.3	77.3
C7	-2.6	-13.1	-6.4	-8.9	0.20	0.71	88.9	77.0
C8	-10.9	-25.4	-14.1	-14.0	0.43	1.00	83.9	69.5
C9	-7.8	-13.8	-6.4	-8.0	0.56	0.80	81.0	74.7
C10	-2.5	-13.6	-5.6	-7.1	0.19	0.79	89.1	74.9
C11	-2.1	-9.5	-5.3	-7.8	0.22	0.69	88.4	77.3
C12	-7.5	-13.0	-6.1	-8.4	0.58	0.72	80.5	76.7
C13	-9.1	-9.8	-5.4	-8.8	0.93	0.62	72.2	78.9
C14	-7.7	-21.7	-11.8	-12.5	0.35	0.94	85.7	71.3
C15	-13.9	-19.7	-10.4	-13.8	0.70	0.76	77.8	75.5
C16	-4.3	-7.6	-3.7	-5.8	0.57	0.64	80.7	78.4

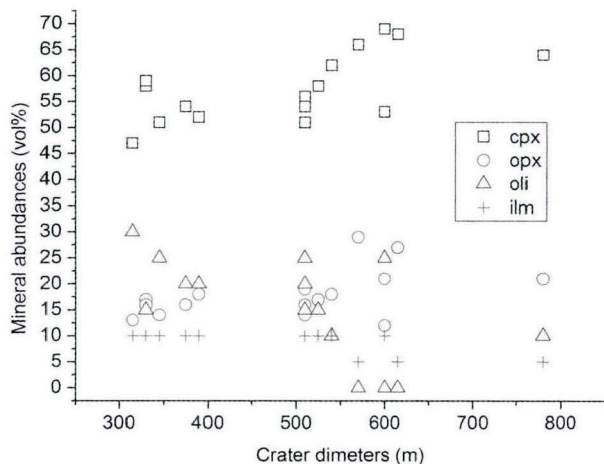


图7 矿物含量与撞击坑直径的散点图

方块代表单斜辉石,圆圈代表斜方辉石,三角号代表橄榄石,十
字叉代表钛铁矿

Fig. 7 The scatter plot of crater diameters and mineral proportions

The squares represent clinopyroxene, circles represent orthopyroxene, triangles represent olivine, crosses represent ilmenite

我们所研究的小撞击坑大部分未穿透上层爱拉托逊纪玄武岩,因此获取的小撞击坑光谱的矿物模式对嫦娥三号着陆区附近年轻玄武岩有较好的代表性。从矿物含量与撞击坑直

径的散点分布图(图7)上可以看出,四种铁镁质矿物的含量随撞击坑直径的变化不大,没有明显的纵向分布规律,表明嫦娥三号着陆区附近的玄武岩矿物组成较为均一,这与该地区极低的反射率、较高的FeO和TiO₂含量等分布特性较为一致,暗示其来源于同一月幔玄武岩岩浆源区。但在撞击坑直径小于400m,即挖掘深度小于约30m时,橄榄石的含量随着撞击坑直径的增加有明显减小的趋势,预示着该地区年轻的玄武岩岩浆可能经历了分步结晶的过程。

5 结论

本研究利用M³高光谱数据提取了嫦娥三号着陆区附近小撞击坑的可见近红外光谱,从遥感的角度获得了对于该地区年轻月海玄武岩矿物组成的认识。LP元素成分数据揭示该区域的岩石类型主要为高铁中钛玄武岩。我们利用Hapke辐射传输模型构建光谱库,利用光谱匹配结合MGM修正,获得了嫦娥三号着陆区铁镁质矿物的模式比例。研究结果表明,该区域矿物分布主要以单斜辉石为主,存在较高比例的橄榄石,其中单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和钛铁矿四种矿物的比例为57.6:18.0:15.3:9.1。这一研究结果有待于与嫦娥三号玉兔号月球车上搭载的红外成像光谱仪数据进行比对,可以从遥感和就位探测两个角度获得对于该地

区矿物和岩石类型的全面认识,深入理解月球年轻玄武岩的成岩历史和演化规律。

致谢 感谢美国 NASA 提供的 M³ 数据,美国布朗大学 RELAB 实验室与美国 USGS 提供的光谱数据。感谢编辑和审稿人对本文的细致评阅和建设性修改意见!

References

- Bowell E, Hapke B, Domingue D, Lumme K, Peltoniemi J and Harris A. 1989. Application of photometric models to asteroids. In: *Asteroids II; Proceedings of the Conference*. Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 524–556
- Cahill JT and Lucey PG. 2007. Radiative transfer modeling of lunar highlands spectral classes and relationship to lunar samples. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E10): E10007
- Clark BE, Lucey P, Helfenstein P, Bell III JF, Peterson C, Veveřka J, McConnochie T, Robinson MS, Bussey B, Murchie SL, Izenberg NI and Chapman CR. 2001. Space weathering on Eros: Constraints from albedo and spectral measurements of Psyche crater. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(12): 1617–1637
- Green RO, Pieters C, Mouroulis P, Eastwood M, Boardman J, Glavich T, Isaacson P, Annadurai M, Besse S, Barr D, Buratti B, Cate D, Chatterjee A, Clark R, Cheek L, Combe J, Dhingra D, Essandoh V, Geier S, Goswami JN, Green R, Haemmerle V, Head J, Hovland L, Hyman S, Klima R, Koch T, Kramer G, Kumar ASK, Lee K, Lundeen S, Malaret E, McCord T, McLaughlin S, Mustard J, Nettles J, Petro N, Plourde K, Racho C, Rodriguez J, Runyon C, Sellar G, Smith C, Sobel H, Staid M, Sunshine J, Taylor L, Thaisen K, Tompkins S, Tseng H, Vane G, Varanasi P, White M and Wilson D. 2011. The Moon Mineralogy Mapper (M³) imaging spectrometer for lunar science: Instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10): E00G19
- Hapke B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 3039–3054
- Hapke B. 2001. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E5): 10039–10073
- Hapke B. 2005. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. 2nd Edition. New York: Cambridge University Press, 1–513
- Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G and Head JW. 2000. Ages of mare basalts on the lunar nearside. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E12): 29239–29275
- Hiesinger H, Head JW, Wolf U, Jaumann R and Neukum G. 2002. Lunar mare basalt flow units: Thicknesses determined from crater size-frequency distributions. *Geophysical Research Letters*, 29(8): 89–1–89–4
- Hiroi T, Pieters CM and Noble SK. 2000. Improved scheme of modified gaussian derouolution for reflectance spectra of lunar soils. In: 31st Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston, Texas; 1548
- 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: Planets*, 107(E12): 13–1–13–2
- Lawrence SJ and Lucey PG. 2007. Radiative transfer mixing models of meteoritic assemblages. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E7): E07005
- Li C, Liu FJ, Zheng XP, Zhang Y, Qiao L and Li DC. 2013. Lunar pyroxene and olivine abundance analysis of Sinus Iridum. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 43(11): 1387–1394 (in Chinese)
- Li L. 2006. Partial least squares modeling to quantify lunar soil composition with hyperspectral reflectance measurements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E4): E04002
- Li S and Li L. 2011. Radiative transfer modeling for quantifying lunar surface minerals, particle size, and submicroscopic metallic Fe. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E9): E09001
- Ling ZC, Liu JZ, Zhang J, Li B, Wu ZC, Ni YH and Sun LZ. 2014. The lunar rock types as determined by Chang' E-1/1M data: A case study of Mare Imbrium-Mare Frigoris region (LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 21(6): 107–120 (in Chinese with English abstract)
- Lucey PG. 1998. Model near-infrared optical constants of olivine and pyroxene as a function of iron content. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E1): 1703–1713
- Lunar H and Institute P. 1981. *Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets*. New York: Pergamon Press, Inc., 1–1286
- Melosh HJ. 1989. *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York: Oxford University Press, 1–253
- Morota T, Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, Honda C, Yokota Y, Kimura J, Ogawa Y, Hirata N, Demura H, Iwasaki A, Sugihara T, Saiki K, Nakamura R, Kobayashi S, Ishihara Y, Takeda H and Hiesinger H. 2011. Timing and characteristics of the latest mare eruption on the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(3–4): 255–266
- Mustard JF and Pieters CM. 1989. Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B10): 13619–13634
- Noble SK, Pieters CM, Hiroi T and Taylor LA. 2006. Using the modified Gaussian model to extract quantitative data from lunar soils. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E11): E11009
- Pieters CM, Head JW, Adams JB, McCord TB, Zisk SH and Whitford-Stark JL. 1980. Late high-titanium basalts of the Western Maria: Geology of the flamsteed region of oceanus procellarum. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B7): 3913–3938
- Pieters CM and Englert PAJ. 1993. *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*. Cambridge: Cambridge University Press, 1–594
- Prettyman TH, Hagerty JJ, Elphic RC, Feldman WC, Lawrence DJ, McKinney CW and Vaniman DT. 2006. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E12): E12007
- Qiao L, Xiao L, Zhao JN and Huang Q. 2013. Geological features and magmatic activities history of sinus Iridum, the moon. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 43(11): 1370–1386 (in Chinese)
- Qiao L, Xiao L and Xiao ZX. 2014. *Thickness of Mare basalts at the landing site of Chang' E-3, the northern Mare Imbrium*. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas; 1832
- Shearer CK, Hess PC, Wieczorek MA, Pritchard ME, Parmentier EM, Borg LE, Longhi J, Elkins-Tanton LT, Neal CR, Antonenko I, Canup RM, Halliday AN, Grove TL, Hager BH, Lee DC and Wiechert U. 2006. Thermal and magmatic evolution of the moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 365–518
- Staid MI and Pieters CM. 2001. Mineralogy of the last lunar basalts: Results from Clementine. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11): 27887–27900
- Staid MI, Pieters CM, Besse S, Boardman J, Dhingra D, Green R, Head JW, Isaacson P, Klima R, Kramer G, Mustard JM, Runyon C, Sunshine J and Taylor LA. 2011. The mineralogy of late stage lunar volcanism as observed by the Moon Mineralogy Mapper on Chandrayaan-1. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E6): E00G10
- Stöffler D, Ryder G, Ivanov BA, Artemieva NA, Cintala MJ and Grieve RAF. 2006. Cratering history and lunar chronology. *Reviews in*

- Mineralogy and Geochemistry, 60(1): 519–596
- Sun LZ, Ling ZC and Liu JZ. 2014. The spectral characteristics and remote detection of minerals in lunar Orientale Basin. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 188–203 (in Chinese with English abstract)
- Sunshine JM, Pieters CM and Pratt SF. 1990. Deconvolution of mineral absorption bands: An improved approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B5): 6955–6966
- Sunshine JM and Pieters CM. 1993. Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the modified Gaussian model. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E5): 9075–9087
- Sunshine JM and Pieters CM. 1998. Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E6): 13675–13688
- Sunshine JM, Pieters CM, Pratt SF and McNaron-Brown KS. 1999. Absorption band modeling in reflectance spectra: Availability of the modified gaussian model. In: 30th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston, Texas: 1306
- Thiessen F, Besse S, Staid MI and Hiesinger H. 2014. Mapping lunar mare basalt units in mare Imbrium as observed with the Moon Mineralogy Mapper (M3). *Planetary and Space Science*, 104(Part B): 244–252
- Xiao L, Zhu PM, Fang GY, Xiao ZY, Zou YL, Zhao JN, Zhao N, Yuan YF, Qiao L, Zhang XP, Zhang H, Wang J, Huang J, Huang Q, He Q, Zhou B, Ji YC, Zhang QY, Shen SX, Li YX and Gao YZ. 2015. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226–1229
- Xu YB, Yan DP, Yu TS and Wang X. 2012. The filling process of mare basalts from late imbric to erathostenian in mare imbricium. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 1306–1319 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 李婵, 刘福江, 郑小坡, 章颖, 乔乐, 李登朝. 2013. 月表虹湾地区辉石及橄榄石含量反演. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 43(11): 1387–1394
- 凌宗成, 刘建忠, 张江, 李勃, 武中臣, 倪宇恒, 孙灵芝. 2014. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海-冷海地区(LQ-4)为例. *地学前缘*, 21(6): 107–120
- 乔乐, 肖龙, 赵健楠, 黄倩. 2013. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 43(11): 1370–1386
- 孙灵芝, 凌宗成, 刘建忠. 2014. 月球东海盆地的矿物光谱特征及遥感探测. *地学前缘*, 21(6): 188–203
- 许延波, 颜丹平, 俞天石, 王翔. 2012. 雨海地区晚雨海世-爱拉托逊纪月海玄武岩充填过程研究. *地质学报*, 86(8): 1306–1319